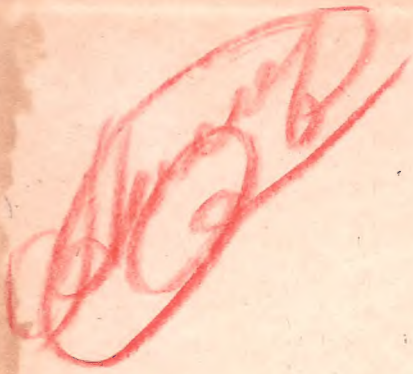
Л.В.Сергиевский • НАЛАДКА РЕГУЛИРОВКА СТАНКОВ

Л.В.Сергиевский

НАЛАДКА РЕГУЛИРОВКА И ИСПЫТАНИЕ СТАНКОВ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ



Л. В. Сергиевский

НАЛАДКА, РЕГУЛИРОВКА И ИСПЫТАНИЕ СТАНКОВ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Допущено Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности в качестве учебного пособия для техникумов по специальности «Эксплуатация и наладка станков с программным управлением.

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» *1974*

6П4.6.08
С 32
УДК 621.9.06—62-529

Гос. научная библиотека ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ

74-38815

Сергиевский Л. В.

С 32 Наладка, регулировка и испытание станков с программным управлением. М., «Машиностроение», 1974.

299 с. с ил.

В книге рассмотрены наладка, регулировка и испытание станков с числовым программным управлением; описаны конструкции основных элементов систем числового программного управления; даны материалы по типовым неисправностям и погрешностям; изложены практические способы повышения надежности систем числового программного управления.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся машиностроительных техникумов, а также может быть использована наладчиками и мастерами, занимающимися эксплуатацией станков с программным управлением.

$\text{С}\ \frac{31304\text{-}111}{038\ (01)\text{-}74}\ 111\text{-}74$ 6П4.6.08

Редактор инж. ***Ю. Е. Михеев***

Рецензент инж. **Ю. М. Жедь**

© Издательство «Машиностроение» 1974 г.

Леонар Владимирович Сергиевский

НАЛАДКА, РЕГУЛИРОВКА И ИСПЫТАНИЕ СТАНКОВ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Редактор издательства *Б. П. Святов* Технический редактор *Л. М. Зубко*
Корректор *А. Е. Мишина* Переплет художника *А. Я. Михайлова*

Сдано в набор 29/I 1974 г. Подписано в печать 20/VIII 1974 г. Т-11991
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 15,54
Уч.-изд. л. 16,4 Тираж 25 000 экз. Заказ 821 Цена 70 коп.

Издательство «Машиностроение» 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10

Предисловие

Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) получили широкое распространение в отечественном и зарубежном машиностроении. Применение станков с ЧПУ — одно из наиболее прогрессивных направлений автоматизации металлообработки на промышленных предприятиях, повышающее производительность в 3—4 раза. Решениями XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. предусмотрено увеличение выпуска станков с ЧПУ не менее чем в 3,5 раза.

В настоящее время создано много образцов станков с ЧПУ, которые внедряются в промышленность. Однако внедрение этой новой техники часто вызывает ряд трудностей. Одной из причин этого является недостаточное знакомство заводских специалистов с особенностями эксплуатации этих станков.

Эксплуатация разнообразных по назначению и конструкции станков и систем ЧПУ показала, что конструкция станков, их элементы, узлы и электронные блоки систем должны отвечать ряду требований, без выполнения которых эксплуатация станков и систем ЧПУ малоэффективна. К этим требованиям относятся создание высоконадежных систем, элементов, узлов и блоков, а также наиболее простых механических, гидравлических, электрических и электронных элементов и узлов, имеющих минимум настроек и регулировок, применение прогрессивных электроприводов подач, создание безлюфтовых соединений в зубчатых и винтовых передачах и т. д.

Настоящая книга ставит своей целью ознакомить читателей с основными вопросами, с которыми столкнется инженерно-технический и обслуживающий персонал при эксплуатации станков и систем ЧПУ. Изложение мате-

риала в книге рассчитано на то, что читателю известны основы теории автоматического регулирования, следящих систем и систем числового программного управления. В случае возникновения трудностей при чтении настоящего пособия рекомендуем обратиться к литературным источникам, указанным в конце книги.

Основное внимание в книге уделено станкам с контурными системами ЧПУ, работающим от программоносителя на магнитной ленте. Автор знакомит читателей с основными наиболее распространенными элементами и узлами, применяемыми в таких станках.

В книге уделено большое внимание вопросам исследования влияния регулировок и настроек на работу станков и систем, узлов и элементов. Даны определения надежности станочных систем по данным об их отказах. Приведены примеры, иллюстрирующие испытания, наладку и регулировку элементов, узлов и систем ЧПУ, повышающих надежность.

Глава I

Типовые системы числового программного управления

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТАНКОВ С СИСТЕМАМИ ЧПУ

Системы ЧПУ нашли широкое применение в металлорежущих станках при обработке деталей сложной геометрической формы, например: лопаток турбин, штампов, пресс-форм элементов фюзеляжа и крыла самолета, фитингов, панелей, шпангоутов, монорельсов, и т. п.

Металлорежущие станки, в которых программа задается в виде математических зависимостей, описывающих требуемую траекторию перемещения центра режущего инструмента относительно детали, или в виде последовательности чисел, характеризующих опорные точки этой траектории, называются станками с числовым программным управлением (ЧПУ).

Порядок технологических операций и движений исполнительных узлов станков вместе с другими необходимыми данными (скорость, длительность) принято называть программой. В частности, в программу работы фрезерного станка входит последовательность работы поперечной, продольной и вертикальной подач станка, привода вспомогательных операций, переключения числа оборотов шпинделя, отвода инструмента, режима охлаждения, смазки и др.

Основной особенностью станков с ЧПУ является то, что информация о заданном законе движения инструмента может быть представлена в виде последовательности чисел и цифр в двоичной системе счисления, импульсами (в унитарном коде) или как преобразование импульсов в фазу переменного тока. Эта информация нанесена на программоноситель, в качестве которого используются перфоленты, перфокарты, магнитные ленты, магнитные

барабаны и т. п. В данной книге рассмотрены только системы станков, где в качестве программоносителя используется магнитная лента.

Программа обработки для станков с ЧПУ может быть подготовлена различными способами: вручную с применением простейшего интерполятора или с помощью цифровых вычислительных машин, с помощью специальной установки с записью на магнитную ленту при копировании шаблона или готовой детали или непосредственно при обработке первой детали вручную.

В комплекс устройств, служащих для обработки числовой информации, т. е. для осуществления по составленной цифровой программе необходимых движений рабочих органов станка, входят:

1) управляющее устройство, которое преобразует по соответствующему закону цифровую информацию, содержащуюся в программе, в управляющие сигналы;

2) станок с необходимым количеством приводов, обеспечивающих движение его рабочих органов от управляющих сигналов в точном соответствии с заданной программой.

На работу станка с системой ЧПУ влияют управляющее устройство, механическая система станка, а также приводы подач, от качества работы которых зависит точность обработки детали и производительность станка. Приводы подач станков с ЧПУ оборудуются электрическими или гидравлическими двигателями.

Точность обработки деталей на станках с ЧПУ достаточно высока, но зависит от назначения станка. Например, для фрезерных станков с фазовой системой ЧПУ для грубой обработки погрешность воспроизведения заданного профиля равна в среднем $\pm 0{,}1$ мм.

Существенное значение для станков с ЧПУ имеют датчики обратной связи по пути и скорости От выбора принципа построения датчиков и их конструктивного выполнения, места установки и качества соединения их с исполнительными органами зависит работа станка и, следовательно, точность обработки детали.

Управляющие устройства станков с ЧПУ выполняются на электронных и полупроводниковых элементах, с большим разнообразием схем блоков и узлов, составленных из этих элементов. От качества изготовления и конструктивного решения этих узлов зависит надежность работы устройства и надежность работы станка.

По технологическому назначению и по типу оборудования, которое автоматизировано с помощью систем числового программного управления, последние разделяются на два вида — контурные и координатные системы ЧПУ.

Контурные системы ЧПУ применяются для автоматизации фрезерных, токарных, раскройных и других станков, осуществляющих формообразование деталей сложной формы, требующих движения рабочих органов с переменными скоростями одновременно по двум или большему числу координат. Особенностью станков с такими системами является необходимость координировать в них движения рабочих органов в каждый момент времени по пути, а для контурных систем ЧПУ с фазовой системой управления — и по скорости.

Координатные системы ЧПУ объединяют большую группу различных станков, имеющих один общий признак; система обеспечивает лишь точность останова (или положения) перемещаемых рабочих органов в точке с заданными координатами. Наиболее типичными представителями станков с координатной системой ЧПУ являются сверлильные и координатно-расточные станки, а также токарные, шлифовальные, фрезерные и другие станки, работающие по так называемому прямоугольному циклу. Характерной особенностью этой системы является то, что движение рабочих органов по координатам может осуществляться одновременно с любой скоростью, которая обусловливается динамикой станка, важно только то, чтобы в конце перемещения система пришла в точку с заданными координатами. В координатных системах станков с прямоугольным циклом рабочие органы перемещаются последовательно со скоростями, обеспечивающими нужный режим резания.

Координатные системы ЧПУ в данной книге не рассматриваются.

По характеру информации, выражающей программу, различают системы ЧПУ следующих видов:

Амплитудные системы ЧПУ. Программа в таких системах задается аналоговыми величинами, в виде чертежа или в виде кривой на киноленте, ординаты которой пропорциональны программируемым перемещениям.

Фазовые системы ЧПУ. Программа задается обычно на магнитной ленте в виде непрерывной синусоидальной функции, фаза которой пропорциональна программируемым перемещениям, а отработка управляющих сигна-

лов производится с помощью следящих приводов фазового типа.

Импульсные системы ЧПУ. Программа записывается на магнитной ленте в виде натурального числа импульсов. Каждый импульс соответствует элементарному перемещению, а частота следования импульсов — скорости движения рабочих органов станка.

Кодовые или цифровые системы ЧПУ. Программа записывается цифровым кодом на перфоленте или перфокарте.

Амплитудные и кодовые системы ЧПУ в данной работе рассмотрены не будут.

По принципу управления системы ЧПУ делятся на два класса: 1) с незамкнутой цепью управления и 2) с замкнутой цепью управления.

В системах с незамкнутой цепью управления движение рабочих органов станка не контролируется и не сравнивается с заданной программой движения.

В настоящее время большинство незамкнутых систем управления станками с ЧПУ выполнено с приводами от шаговых двигателей, где каждый импульс, считываемый с программоносителя, усиленный для управления шаговым двигателем, вызывает поворот вала двигателя на определенный угол. Точность воспроизведения движения рабочих органов станка в данном случае определяется точностью отработки двигателем отдельных шагов и точностью кинематической цепи, передающей движение рабочему органу.

Если во время перемещения рабочего органа станка вследствие переменной нагрузки, либо вследствие неисправности управляющей схемы шагового двигателя, либо по каким-то другим причинам шаговый двигатель не воспроизвел одного или нескольких импульсов, то ошибка при воспроизведении программы существенно возрастет. Поэтому в таких системах станков для обеспечения легкости хода и повышения точности кинематических передач применяются прецизионные шариковые винтовые беззазорные пары.

Станки с незамкнутой цепью управления на шаговых двигателях просты по конструкции, но оборудованные двигателями старой конструкции имеют серьезные ограничения по скорости перемещения рабочих органов и малые технологические возможности.

Наиболее распространенной системой ЧПУ с незамкнутой цепью управления, широко применяемой в про-

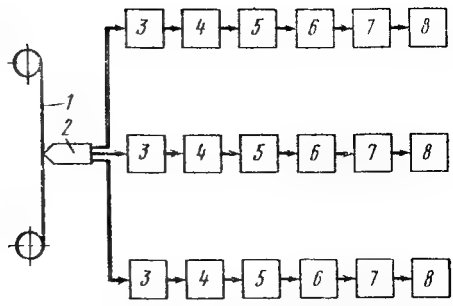


Рис. 1. Незамкнутая система ЧПУ с импульсно-шаговым приводом (трехкоординатная)

мышленности, является импульсно-шаговая система с использованием привода от шаговых двигателей. Блок-схема такой системы приведена на рис. 1. Рассмотрим работу данной схемы. Программа обработки записана на магнитной ленте в унитарном коде. Каждый импульс кода соответствует перемещению рабочего органа станка (стол, пиноль, суппорт и т. п.) на один элементарный шаг. Для управления перемещением рабочих органов станка на магнитной ленте предусмотрены для каждого рабочего органа дорожки записи с импульсами двух полярностей, причем импульсы положительной полярности соответствуют движению рабочего органа в одну сторону, а отрицательной — в другую.

Сигналы, считываемые с магнитной ленты *1* магнитной головкой *2*, усиливаются импульсными усилителями *3* и формируются в блоках формирования *4* в прямоугольные импульсы. Прямоугольные импульсы попадают на кольцевой распределитель-коммутатор *5* и распределяются, коммутируя обмотки шагового двигателя *6*, который начинает вращаться. Вращаясь, шаговый двигатель при достаточной мощности может перемещать рабочий орган станка сам или с помощью усилителей моментов, связанных с рабочими органами *8* через исполнительные устройства *7*.

Блоки управления такой системы ЧПУ выполняются, как правило, на электронных или полупроводниковых элементах; частота следования сигналов по каналам системы и обмоткам шагового двигателя колеблется от 500 до 800 Гц (при двигателях старой конструкции), что соответствует скорости перемещения рабочих органов до 1 м/мин.

В замкнутой системе управления величина пути, на которую перемещается рабочий орган станка, контроли-

руется специальным датчиком положения и непрерывно или периодически сравнивается с величиной пути, заданной в программе. Ошибка, или величина рассогласования между истинным положением рабочего органа и заданным в программе, сравнивается в специальном устройстве, которое вырабатывает сигнал управления приводами подач.

Наиболее простой системой ЧПУ с замкнутой цепью управления, нашедшей широкое применение в различных моделях станков, является фазовая система ЧПУ со следящими приводами подач. Фазовая система ЧПУ по сравнению с другими системами имеет минимальный объем электронного оборудования и очень простые и надежные датчики положения, которые выпускаются нашей промышленностью серийно.

Блок-схема фазовой системы управления, работающей от магнитной ленты, представлена на рис. 2 (для одной координаты).

На двух дорожках магнитной ленты *1* записаны синусоидальные сигналы: рабочий $U_m \sin(\omega t + \varphi)$ и опорный $U_m \cos \omega t$. Фаза φ рабочего сигнала определяет закон изменения управляемой координаты α. Эти сигналы считываются магнитной головкой *2* и усилителями *3* и *4*. Усилитель *4* опорного сигнала питает входные обмотки вращающегося трансформатора *7*, являющегося датчиком обратной связи по положению. Ротор вращающегося трансформатора *7* кинематически связан с управляемой координатой α. Его выход, на котором получается сигнал вида $U_m \cos(\omega t + \varphi')$, где φ'—электрический угол, пропорциональный механическому углу α, подается на один из входов фазового дискриминатора *5*, являющегося в первом приближении множительным устройством. На другой вход фазового дискриминатора *5* подается рабочий сигнал $U_m \sin(\omega t + \varphi)$. В результате перемножения этих

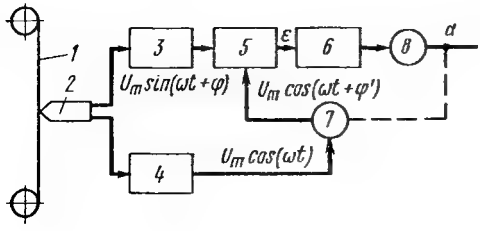


Рис. 2. Замкнутая система ЧПУ с фазовым управлением (показана одна координата)

сигналов на выходе получается сигнал, постоянная составляющая ε которого пропорциональна $U_m \sin(\varphi - \varphi')$. Это напряжение является сигналом ошибки следящего привода. Далее этот сигнал усиливается усилителем мощности *6* и подается на двигатель *8*, который стремится установить управляемую координату α в такое положение, при котором сигнал ошибки равен или близок нулю. Это произойдет, если будет выдержано условие $\varepsilon = \sin(\varphi - \varphi') \approx 0$ или $\varphi - \varphi' \approx 0$. Если заданный угол φ изменяется во времени по какому-то закону, то угол α с помощью двигателя *8* будет поддерживаться таким, чтобы он был приблизительно равен углу φ.

§ 2. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ ЧПУ

Практически можно обеспечить любую точность работы электронного управления, но получить любую точность станка нельзя, потому что она зависит от точности и надежности измерения положения рабочих органов станка. Кроме того, из-за невозможности измерения непосредственно обрабатываемой детали, ее размеры мы получаем косвенным образом, проверяя положение рабочих органов. Таким образом, на точность детали оказывают влияние многие факторы, которые невозможно учесть в программе. Обеспечить работу следящего привода в контурных системах ЧПУ с требуемой точностью и надежностью — достаточно трудная задача, которая не имеет непосредственного отношения к программному управлению, но обязательно должна решаться совместно с другими задачами при создании систем программного управления.

В зависимости от габаритных размеров станка, технологических требований, вида применяемых датчиков могут быть реализованы различные структуры систем ЧПУ, применяемые в станках с программным управлением. Рассмотрим наиболее типичные станки с ЧПУ, нашедшие широкое применение в промышленности и зарекомендовавшие себя как наиболее надежные и производительные станки. Блок-схема управления одной координатой фрезерных станков типа 6Н13-ГЭ2, ГФ-770 и ФП-4 с импульсно-шаговой системой ЧПУ приведена на рис. 3, *а*.

Считываемый магнитной головкой *2* сигнал с магнитной ленты *1* представляет собой «пакеты» синусоидальных колебаний с частотой 2,5 кГц. Длительность «пакета» равна трем периодам частоты следования импульсов

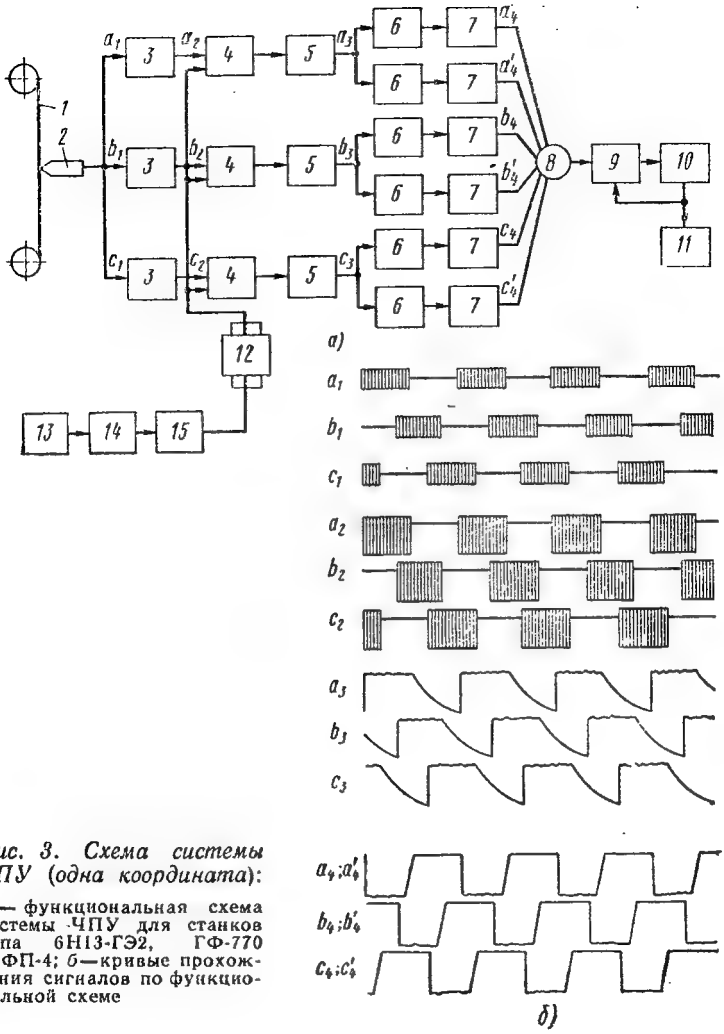


Рис. 3. Схема системы ЧПУ (одна координата):

а — функциональная схема системы ЧПУ для станков типа 6Н13-ГЭ2, ГФ-770 и ФП-4; *б* — кривые прохождения сигналов по функциональной схеме

с кодового преобразователя и задается с помощью узла распределения устройства записи. Следовательно, в зависимости от частоты следования импульсов в устройстве записи, меняется длительность «пакета», считываемого с магнитной головки. Одна магнитная дорожка может управлять только одной секцией шагового двигателя, поэтому для трехкоординатной системы ЧПУ необходимо иметь девять дорожек магнитной записи. Для системы

управления станками типа 6Н13-ГЭ2, ГФ-770 и ФП-4 применена девятиканальная магнитная головка типа МГ-35/9.

Сигналы, считываемые с магнитной головки, поступают на трехкаскадные усилители считывания, первые два каскада *3* осуществляют прямое усиление, третий *4* формирует импульс прямоугольной формы со скважностью — два. Суммарный коэффициент усиления усилителя считывания — 1200. Сигналы прямоугольной формы поступают на эмиттерные повторители *5*, распределяющие сигналы по двум каналам — в эмиттерные повторители *6*. Эмиттерные повторители *6* служат для распределения сигналов по обмоткам шагового двигателя и согласования выходного сопротивления усилителей считывания с входным сопротивлением усилителей мощности *7*. Усилители мощности попарно управляют обмотками шагового двигателя *8*. Для уменьшения постоянной составляющей времени обмоток шагового двигателя последовательно с ними включены активные балластные сопротивления. График прохождения сигналов по функциональной схеме показан на рис. 3, *б*.

Шаговый двигатель, вращая управляющий золотник *9*, управляет гидроусилителем моментов *10*, который приводит в движение рабочий орган *11*. Между рабочим органом и управляющим золотником существует жесткая обратная связь.

В станке предусмотрено ручное управление перемещением рабочих органов. Система ручного управления состоит из генератора импульсов, усилителя-формирователя и узла распределения.

Генератор импульсов *13* представляет собой мультивибратор с изменяющейся частотой. Перекрытие диапазона частот от 2 до 500 Гц осуществляется путем переключения емкостей обратной связи мультивибратора. С генератора импульсов сигналы поступают на эмиттерный повторитель *14* и далее на усилитель ручного управления *15*, где сигналы усиливаются и формируются. С усилителя ручного управления сигналы поступают на кольцевой узел распределения *12*, который представляет собой электронный кольцевой счетчик и предназначен для коммутации обмоток трех секций шагового двигателя при поступлении импульсов с генератора ручного управления. Схема коммутатора обеспечивает получение шести комбинаций включения обмоток шагового двигателя.

Фрезерные станки третьего габарита модели 6Н13-ГЭ2, выпускаемые Горьковским заводом фрезерных станков, получили наибольшее распространение в промышленности. Для обеспечения точности линейного перемещения на приводе салазок, стола и пиноли станка применены шариковые рециркуляционные винтовые пары. С помощью ручного пульта управления и по лимбам производится установка нулевой точки. Станки укомплектованы пультами ПРС-3К или ПРС-3-61; пульты оборудованы лентопротяжными механизмами со скоростью протягивания магнитной ленты 200 мм/с. Электронная часть пульта выполнена на полупроводниковых элементах. На машиностроительных заводах оборудованы участки станками такого типа (рис. 4).

Другими представителями станков с ЧПУ, применяющимися в промышленности, являются станки, оборудованные фазовыми системами ЧПУ. Фазовые системы ЧПУ являются простыми, надежными при работе в цеховых условиях и не имеют накопленной ошибки. Для того

Рис. 4. Участок станков с импульсно-шаговыми системами ЧПУ модели 6Н13-ГЭ2

Фрезерные станки третьего габарита модели 6Н13-ГЭ2, выпускаемые Горьковским заводом фрезерных станков, получили наибольшее распространение в промышленности. Для обеспечения точности линейного перемещения на приводе салазок, стола и пиноли станка применены шариковые рециркуляционные винтовые пары. С помощью ручного пульта управления и по лимбам производится установка нулевой точки. Станки укомплектованы пультами ПРС-3К или ПРС-3-61; пульты оборудованы лентопротяжными механизмами со скоростью протягивания магнитной ленты 200 мм/с. Электронная часть пульта выполнена на полупроводниковых элементах. На машиностроительных заводах оборудованы участки станками такого типа (рис. 4).

Другими представителями станков с ЧПУ, применяющимися в промышленности, являются станки, оборудованные фазовыми системами ЧПУ. Фазовые системы ЧПУ являются простыми, надежными при работе в цеховых условиях и не имеют накопленной ошибки. Для того

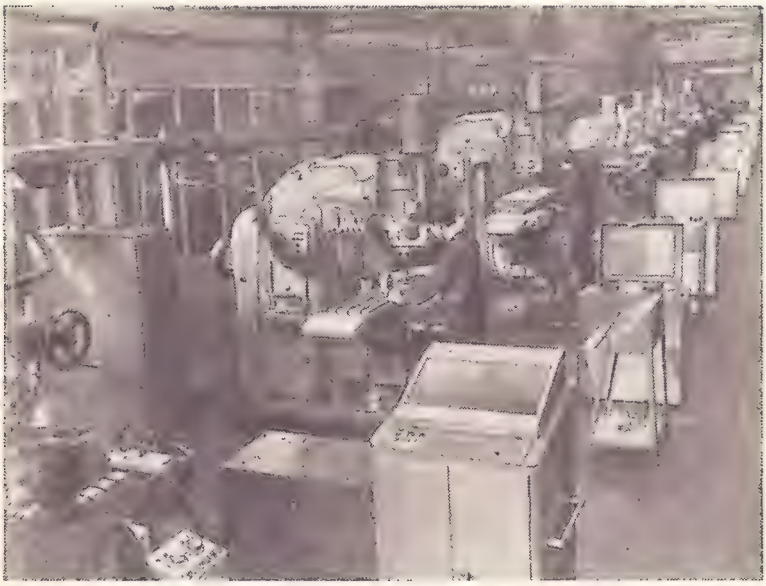


Рис. 4. Участок станков с импульсно-шаговыми системами ЧПУ модели 6Н13-ГЭ2

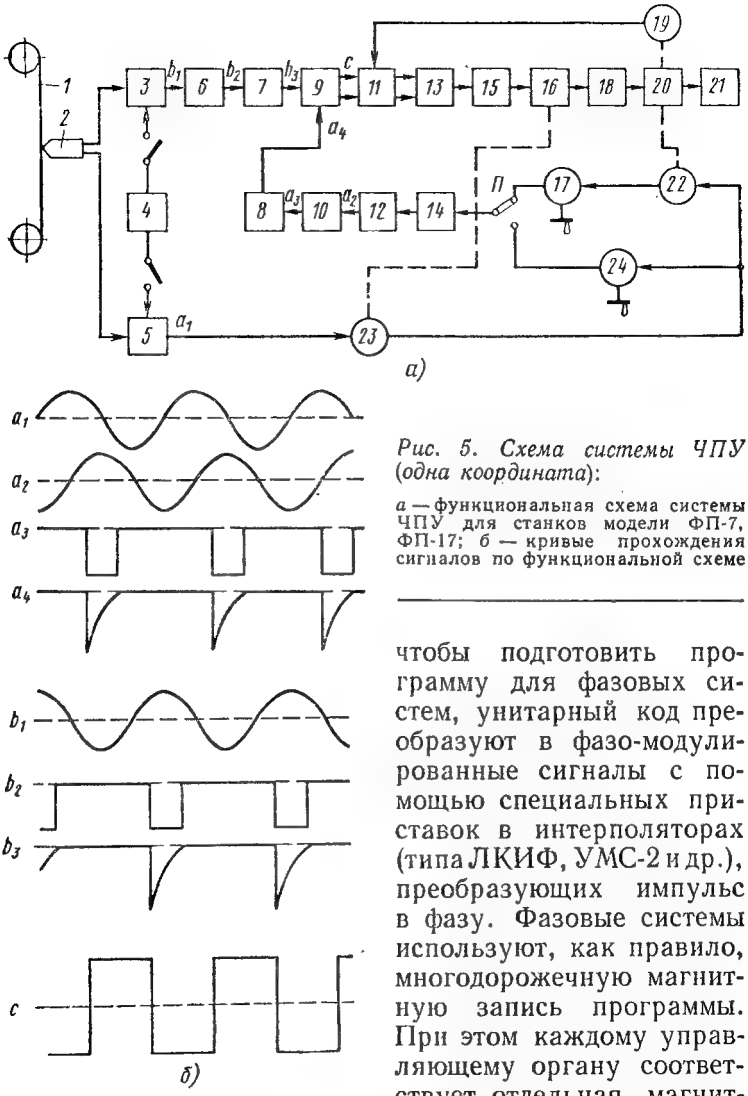


Рис. 5. Схема системы ЧПУ (одна координата):

а — функциональная схема системы ЧПУ для станков модели ФП-7, ФП-17; *б* — кривые прохождения сигналов по функциональной схеме

чтобы подготовить программу для фазовых систем, унитарный код преобразуют в фазо-модулированные сигналы с помощью специальных приставок в интерполяторах (типа ЛКИФ, УМС-2 и др.), преобразующих импульс в фазу. Фазовые системы используют, как правило, многодорожечную магнитную запись программы. При этом каждому управляющему органу соответствует отдельная магнитная дорожка. Для записи команд в трех координатах требуется четыре магнитные дорожки; три предназначены для рабочих сигналов и одна для опорного сигнала.

Упрощенная функциональная схема управления станками с ЧПУ типа ФП-7, ФП-17 приведена на рис. 5, *а*. Привод рабочего органа станка охвачен главной обрат-

ной связью по положению фазового типа. В качестве датчика использован вращающийся трансформатор типа ВТМ-1В. Последовательно с датчиком главной обратной связи установлен вращающийся трансформатор, являющийся датчиком следящего электрического вала, служащего для работы от пульта ручного управления. В системе применен гидропривод объемного регулирования. В качестве датчика обратной связи гидропривода применен редусин *23* — многополюсный вращающийся трансформатор, который механически связан с сервоприводом *16*, питаемым от золотника *15*. Золотник питается от специального гидронасоса подпитки.

Когда переключатель *П* находится в верхнем положении, сигнал от усилителя опорного сигнала *5* проходит через редусин *23*, датчик главной обратной связи по положению *22* и через датчик ручного управления. При работе по программе от магнитной ленты рукоятка датчика ручного управления фиксируется механическим запором, однако при необходимости с ее помощью можно изменить начальное положение программы на любую величину. При нижнем положении переключателя *П* главная обратная связь разрывается, а сигнал подается от генератора опорного сигнала *4*, который при работе по программе автоматически отключается. При этом сигнал от редусина *23* проходит через вращающийся трансформатор *24*, являющийся регулятором. С помощью регулятора можно установить любое положение сервопривода *16*, обеспечивающее требуемую скорость разомкнутого гидропривода.

Устойчивость системы и надлежащее качество управления обеспечиваются обратной связью по скорости, роль которой выполняет тахогенератор *19*, кинематически связанный с гидродвигателем *20*.

Управляющий сигнал, считанный с магнитной ленты *1* магнитной головкой *2*, настроенной в резонанс на частоту 250 Гц, подается на усилитель считывания *3*, в котором введена глубокая отрицательная обратная связь, обеспечивающая устойчивую работу усилителя и делающая его менее чувствительным к колебаниям напряжения и температуры окружающей среды. Коэффициент усиления считывания — 400. После усиления и двустороннего ограничения синусоидального сигнала по амплитуде в усилителе-ограничителе *6* прямоугольный сигнал с помощью дифференцирующей цепочки *7*

формируется в остроконечные импульсы малой длительности.

Опорное напряжение с выхода вращающегося трансформатора *17* или *24* подается на суммирующую цепочку *14*, усиливается усилителем датчиков обратной связи *12*, ограничивается усилителем-ограничителем *10* и преобразуется дифференцирующей цепочкой *8* в остроконечные импульсы. Остроконечные импульсы управляющего и опорного сигналов поступают на входы фазового дискриминатора *9*. В качестве фазового дискриминатора применен потенциальный статический триггер с диапазоном работы $\pm 180°$.

Взаимное расположение остроконечных импульсов определяется фазовым углом сдвига напряжений управляющего и опорного сигнала. Если эти напряжения сдвинуты относительно друг друга на 180°, то импульсы на одном из входов триггера будут приходить через полпериода после прихода импульсов на втором входе. В этом случае с выхода триггера будут сниматься напряжения одинаковой формы с одинаковыми длительностями. При изменении взаиморасположения входных сигналов от 180° в ту или другую сторону изменяется длительность выходных сигналов и появляется различие в средних значениях выходных напряжений. Эта разница в выходных напряжениях триггера называется напряжением рассогласования. График прохождения сигналов по функциональной схеме изображен на рис. 5, *б*.

Выходные напряжения обеих половин триггера через эмиттерные повторители поступают на вход балансного усилителя постоянного тока *11*, в цепи которого включены обмотки электромеханического преобразователя ЭМП *13*, жестко соединенного с управляющим золотником *15* гидропривода подачи. При наличии различных напряжений на входах балансного усилителя *11*, через встречно включенные обмотки ЭМП *13* протекают различные токи, что ведет к смещению сердечника ЭМП *13* и соответственно золотника. Управляющий золотник *15* действует на сервопривод *16*, который меняет производительность гидронасоса *18* и соответственно скорость вращения гидродвигателя *20*, вызывая его вращение в сторону уменьшения величины рассогласования (на схеме рабочий орган станка обозначен поз. *21*).

Система управления станком в режиме «перемотка» или «ускоренная перемотка вперед» (магнитной ленты)

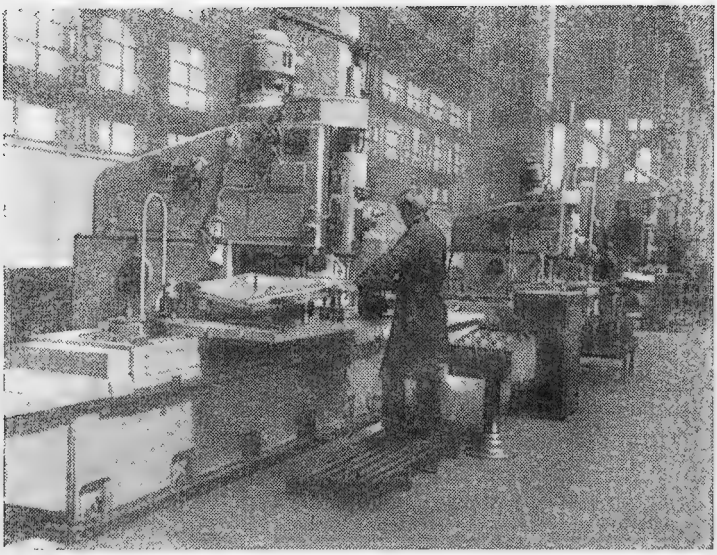


Рис. 6. Участок станков с фазовыми системами ЧПУ модели ФП-7

автоматически, с помощью релейной группы, устанавливается на собственный генератор опорного сигнала *4*, при этом напряжения, поступающие в управляющий и опорный каналы, будут в одинаковой фазе и приводы подач будут находиться в устойчивом состоянии.

Станки с приведенной системой управления предназначены для обработки как стальных деталей, так и деталей из легких сплавов, для чего у них имеется коробка скоростей, регулирующая вращение шпинделя. Гидроприводы на данном станке применены с максимальным моментом 5 кгм, развивают скорость по программе до 1,5 м/мин при цене оборота фазы 0,64 мм. Такие мощные двигатели подач позволяют обрабатывать детали из цветных металлов и стали без переключения кинематики цепи подач. Обратная связь у этих станков «укороченная», взятая непосредственно от гидродвигателя. При наличии шариковых винтов с автоматической выборкой люфтов это не приводит к заметной потере точности, которая для станков данного типа равна $\pm 0{,}1$ мм. На рис. 6 изображен участок станков с фазовыми системами ЧПУ.

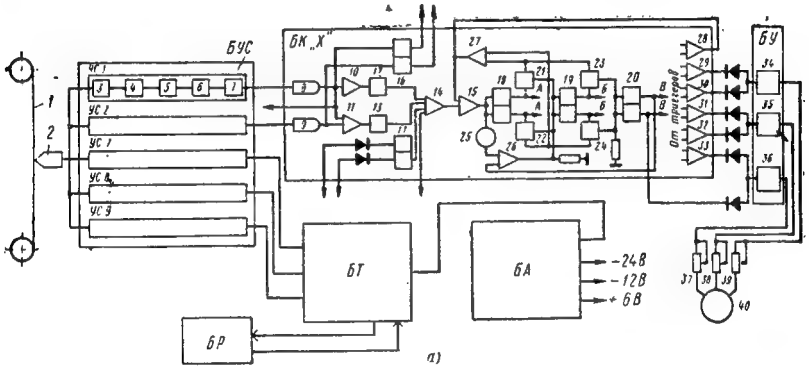
Рис. 6. Участок станков с фазовыми системами ЧПУ модели ФП-7

автоматически, с помощью релейной группы, устанавливается на собственный генератор опорного сигнала *4*, при этом напряжения, поступающие в управляющий и опорный каналы, будут в одинаковой фазе и приводы подач будут находиться в устойчивом состоянии.

Станки с приведенной системой управления предназначены для обработки как стальных деталей, так и деталей из легких сплавов, для чего у них имеется коробка скоростей, регулирующая вращение шпинделя. Гидроприводы на данном станке применены с максимальным моментом 5 кгм, развивают скорость по программе до 1,5 м/мин при цене оборота фазы 0,64 мм. Такие мощные двигатели подач позволяют обрабатывать детали из цветных металлов и стали без переключения кинематики цепи подач. Обратная связь у этих станков «укороченная», взятая непосредственно от гидродвигателя. При наличии шариковых винтов с автоматической выборкой люфтов это не приводит к заметной потере точности, которая для станков данного типа равна $\pm 0{,}1$ мм. На рис. 6 изображен участок станков с фазовыми системами ЧПУ.

Одной из разновидностей импульсно-шаговых систем ЧПУ является система «Контур 4МИ-68», предназначенная для станков типа 6Н13-Ф3. Функциональная схема системы приведена на рис. 7, *а*. Эта система использует для управления унитарный код. Сигналы — однополярные импульсы, записаны для каждой координаты по двум дорожкам.

Для считывания информации с магнитной ленты *1* служит считывающее магнитное устройство, состоящее из лентопротяжного механизма и блока усилителей считывания *БУС*. Для воспроизведения информации применяется девятидорожечная магнитная головка ГМВ-35/9. Электрические сигналы амплитудой до 10 мВ с магнитной головки *2* поступают на усилители считывания *УС 1* и



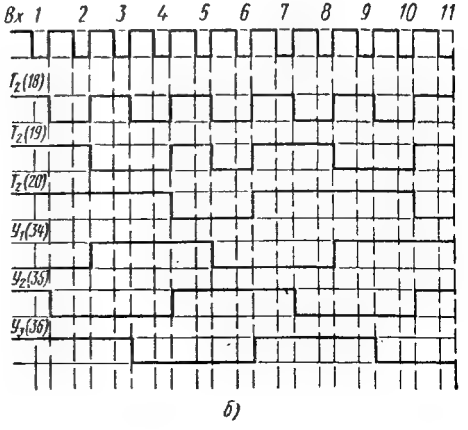


Рис. 7. Схема системы ЧПУ:

а — функциональная схема системы ЧПУ для станков типа 6Н13-Ф3 и 1К62-Ф3 (одна координата); *б* — график работы триггеров (*Т*) и усилителей (*У*) системы при движении исполнительного узла в одну сторону

УС 2 для одной координаты и, соответственно, по всем остальным координатам. Одновременно считываются и сигналы технологических команд соответствующими усилителями *УС 7*, *УС 8*, *УС 9*.

Каждый усилитель считывания состоит из трех каскадов усиления *3*, *4* и *5* с общим коэффициентом усиления 1400, эмиттерного повторителя *6* и усилителя-ограничителя *7*. В целях получения большого соотношения сигнал/шум первый каскад усилителя *3* поставлен в режим с малым коллекторным током и с коэффициентом усиления, равным четырем. Эмиттерный повторитель *6* служит для согласования большого выходного сопротивления третьего каскада усилителя *5* с малым входным сопротивлением усилителя-ограничителя *7*. С выхода усилителей считывания сигналы поступают соответственно на блоки электронных коммутаторов *БК* и блок технологических команд *БТ*. Для управления устройством «контур 4МИ» в систему введен блок автоматики *БА*.

Электронный коммутатор состоит из каскадов формирования сигналов *8*, *9*, *10*, *11*, *12* и *13*, каскадов согласования *14* и *15*, триггера признака направления *16*, генератора одиночных импульсов *17*, реверсивного счетчика, состоящего из элементов *18*, *19*, *20*, *21*, *22*, *23*, *24*, *25*, *26* и *27* и дешифратора *28*, *29*, *30*, *31*, *32* и *33*. Электронный коммутатор имеет два входа. Входные сигналы формируются формирователями *8* и *9* в прямоугольные импульсы, которые поступают на разделенные входы триггера *16* и через элементы «не» (*10*, *11*) на задержки сигналов (*12* и *13*). Триггер *16* первым импульсом устанавливается в такое состояние, которое соответствует направлению поступающих сигналов (прямой и обратный ход). Временны́ми элементами *12* и *13* осуществляется задержка сигналов, поступающих на вход реверсивного счетчика *18*, относительно сигналов, управляющих триггером признака *16*, что обеспечивает подачу признака направления на реверсивный счетчик до прихода управляющих импульсов.

Триггеры реверсивного счетчика *18*, *19*, *20*, вследствие обратной связи, имеют цикл, равный шести. Обратная связь подается на триггер *19* через схему запрета *25*, *26* в том случае, если триггер *20* находится в состоянии единицы. Таким образом, после двоичного числа 100 (четыре) при поступлении следующего импульса в счетчик записывается число 111 (семь). Связь между триггерами счетчика осу-

ществляется через потенциально-импульсные ячейки *21*, *22*, *23* и *24*, играющие роль вентилей. Эти вентили управляются нулевыми потенциалами по шинам прямого и обратного хода с триггера признака направления *16* в автоматическом режиме и с генератора *17* в ручном режиме. При прямом ходе счетчик работает как суммирующий, при обратном — как вычитающий. Импульсы счетчика поступают на дешифратор *28—33*. С выхода электронного коммутатора сигналы поступают на усилители *БУ*, нагрузкой которых являются обмотки шагового двигателя *40*. Усилитель *БУ* состоит из трех усилителей *34*, *35* и *36*, каждый из которых имеет по два входа. Входные схемы встроены в усилители и выполняют логическую операцию ИЛИ. Благодаря этому, шеститактная система импульсов *БК* превращается в трехфазную, на каждом из трех выходов которой сигнал существует $^1/_2$ периода. Сигналы сдвинуты относительно друг друга на $^1/_3$ периода.

Графики работы триггера *БК* и усилителей *БУ* показаны на рис. 7, *б*. Для увеличения быстродействия питание обмоток шаговых двигателей производится через форсировочные резисторы *37*, *38* и *39*.

Сигналы технологических команд (в виде пакетов импульсов частотой 800—1000 Гц) поступают в блок технологических команд, где преобразуются в постоянное напряжение, включающее электромагнитные реле *БР*, контакты которых замыкают исполнительные цепи технологических команд. Блок автоматического управления *БА* служит для автоматического управления лентопротяжным устройством.

Для работы в ручном режиме от переключателей, установленных на пульте, в устройстве предусмотрен генератор ручного управления с частотами 3, 50, 100, 200, 500 и 800 Гц.

Интерес представляет станок с системой ЧПУ и дроссельной системой регулирования гидропривода типа ПФП-1. Станок предназначен для фрезерования наружных и внутренних контуров деталей из алюминиевых и магниевых сплавов.

Обрабатываемую деталь устанавливают на вертикальный стол, имеющий вакуумный прижим. Стол перемещается по горизонтальным направляющим станины. По вертикальным направляющим неподвижной колонны перемещается каретка, несущая фрезерную головку.

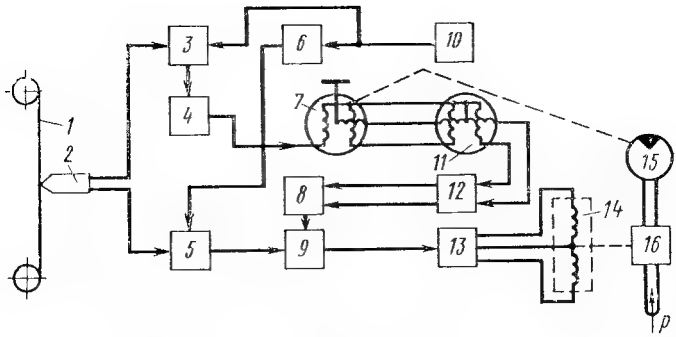


Рис. 8. Функциональная схема системы ЧПУ с дроссельным регулированием станка ПФП-1 (одна координата)

Головка перемещается по направляющим каретки в плоскости, перпендикулярной к столу. Все три рабочих перемещения осуществляются от индивидуальных гидродвигателей через редукторы и винты с шариковыми гайками. Гидродвигатели питаются от общей насосной станции. В гидросистеме применено дроссельное регулирование.

Функциональная схема станка приведена на рис. 8.

При работе по программе неизменный по фазе опорный сигнал считывается с магнитной ленты *1* головкой *2*, усиливается усилителем опорного сигнала *3* и через согласующий каскад усилителя *4* вращающегося трансформатора *7* подается для его питания. Вращающийся трансформатор является датчиком обратной связи по положению. Последовательно с ним напряжение подается на другой вращающийся трансформатор *11*, служащий для управления системой станка в ручном режиме. Выходное напряжение, снимаемое с вращающегося трансформатора *11*, подается на переключатель направления обработки *12*, с помощью которого происходит изменение направления движения рабочего органа станка, а следовательно, и направления обработки детали. Напряжение, определяющее фактическое положение рабочего органа станка, подается далее через усилитель вращающегося трансформатора *8* в фазовый дискриминатор *9*.

Сигнал, определяющий программу работы станка по данной координате, считывается с магнитной ленты, усиливается усилителем сигнала управления *5* и подается на схему фазового дискриминатора *9*.

Выходное напряжение фазового дискриминатора определяет величину фазы и напряжения рассогласования между значением координаты заданной программой и фактическим положением этой координаты на станке. Напряжение с фазового дискриминатора подается в балансный усилитель постоянного тока *13* следящего привода станка.

Элементами следящего привода являются электромеханический преобразователь *14* и механически соединенный с ним управляющий золотник *16*.

При изменении выходного напряжения фазового дискриминатора происходит разбаланс токов в анодных цепях балансного усилителя, в цепи которого включены обмотки электромеханического преобразователя (суммарное значение токов, протекающих по обмоткам преобразователя, всегда постоянно). При изменении баланса в усилителе происходит изменение токов, протекающих по каждой из обмоток преобразователя, и отклонение его сердечника в ту или другую сторону. При отклонении сердечника преобразователя от нейтрального (нулевого) положения происходит смещение золотника, который жестко соединен с сердечником преобразователя. Золотник открывает рабочие щели и подает рабочую жидкость в гидродвигатель *15* — начинается движение рабочего органа станка под действием давления жидкости p.

Для установки рабочих органов в исходное (нулевое) положение или при работе вручную в системе управления предусмотрен режим, когда станок управляется не от программы, а от внутреннего генератора *10*. Сигналы с генератора через фазовращающую цепь *6*, служащую для согласования по фазе управляющего и опорного сигналов, подаются в систему станка. Согласование по фазе сигналов необходимо для того, чтобы при переходе с ручного управления на работу от программы не происходило скачка рабочих органов, так как при рассогласовании выдается сигнал с фазового дискриминатора на балансный усилитель. При работе вручную или установке рабочих органов в нулевое положение, поворачивая рукоятку вращающегося трансформатора *11*, вызывают рассогласование между управляющим и опорным сигналами по фазе, фазовый дискриминатор выдает сигнал на усилитель постоянного тока *13* и, воздействуя на преобразователь *14*, перемещают золотник. Золотник *16*, воздействуя на гидродвигатель *15*, перемещает рабочий орган станка.

§ 3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАНКАМ И СИСТЕМАМ ЧПУ

Применение в промышленности систем ЧПУ, позволяющих расширить технологические возможности станков, привело к тому, что изменилась конструкция отдельных узлов, их компоновка, а также произошло изменение конструкции станка.

Основной особенностью числового программного управления является то, что информация, необходимая для обработки детали на станке, рассчитывается и задается в числовом виде. Такая числовая программа не может быть непосредственно воспринята и отработана устройством управления станка. Для этого она должна быть закодирована в определенной системе счисления и нанесена на программоноситель в виде записи, которая может быть считана и воспринята устройством, предназначенным для ввода программы в систему управления станком.

В системах управления станками с ЧПУ контурного типа для преобразования числовой программы применяются так называемые интерполяторы или кодовые преобразователи. Эти устройства могут быть встроены в систему управления станком или могут находиться отдельно от него. В случае, если интерполятор эксплуатируется отдельно от станка, декодированная программа, получаемая с интерполятора, записывается на промежуточный программоноситель — магнитную ленту в виде командных импульсов или приращения фазы переменного тока. Такая форма записи программы уже непосредственно может быть использована для управления приводами подач станка.

Следящие приводы появились в копировальных станках задолго до появления станков с ЧПУ. Опыт, накопленный при создании станков с копировальными системами, в которых применены электрические или гидравлические следящие приводы, явился базой для создания станков с системами ЧПУ. В отличие от копировальных станков, станки с ЧПУ являются многоприводными станками, обеспечивающими движение по трем и большему числу координат одновременно.

Станки с ЧПУ имеют широкий диапазон регулирования скоростей перемещения рабочих органов, так как при обработке деталей на этих станках применяются различные материалы. Например, для обработки стали необ-

ходима скорость 0,2—0,3 м/мин, а для цветных сплавов 2—3 м/мин. Желательно, чтобы система бесступенчатого регулирования привода перекрывала весь этот диапазон.

Из условий резания для станков с ЧПУ привод выполняется более качественным, чем для универсальных станков, с высокой жесткостью и быстродействием, чтобы время разгона и торможения на участках обрабатываемого контура с резким изменением направления скорости не превышало времени поворота фрезы на один зуб, иначе неизбежен интенсивный износ инструмента.

Другой особенностью приводов подач станков с ЧПУ является скачкообразный характер изменения скорости подачи при сравнительно медленном и плавном изменении этой скорости в промежутках между скачками. Наиболее характерными примерами таких изменений скорости являются детали, контуры которых состоят из отрезков прямых, расположенных под значительными углами относительно друг друга.

Наличие датчиков обратной связи является характерной особенностью как контурных, так и координатных систем с замкнутой цепью управления. Вследствие высокой точности, требующейся для станков с ЧПУ при большом диапазоне измерения, применяемые в них датчики обратной связи несут большой объем информации в систему управления о размерах обрабатываемой детали или о положении рабочего органа станка. От точности датчиков зависит достижение заданных размеров детали. Применение привода подач, для станков с ЧПУ, с высоким быстродействием и незначительными ошибками датчиков обратной связи теряет смысл при малой динамической жесткости кинематики механических узлов. Это обусловлено снижением статической ошибки от деформации, возникающей при наличии упругих звеньев вне обратной связи. Особенно это заметно при обработке титановых сплавов, так как резко возрастает сила резания.

В отличие от копировальных систем управления, в системах ЧПУ наряду с обычным применением электрических схем и элементов автоматики очень широко применены электронные схемы на полупроводниковых элементах, элементы и блоки вычислительной техники. Подчас к станкам для управления процессом обработки по программе подключают специализированную вычислительную или управляющую машину.

Наряду с тем что станки должны обеспечить высокое быстродействие, жесткость и т. п., к системам управления, станкам, узлам и элементам предъявляются повышенные требования надежности. Важность этой проблемы определяется тем, что недостаточная надежность приводит к появлению брака обрабатываемой детали или к аварии оборудования. Одним из путей обеспечения требуемой надежности станков с ЧПУ является контроль их работоспособности, который обеспечивается применением специальных средств.

Эксплуатация станков с системами ЧПУ показала, что их конструкция должна отвечать ряду требований, без выполнения которых применение станков с ЧПУ в промышленности малоэффективно. Ниже приведены основные требования, которые предъявляются к станкам и системам ЧПУ [8, 19, 32, 33].

1. Выполнение механизмов подач с минимально возможными зазорами. Малой величины зазоров можно достичь применением шариковых и гидростатических винтовых передач, механизмов автоматической ликвидации зазора в винтовой передаче, предварительным натягом подшипников в опорах винтов, применением коротких кинематических цепей и средств ликвидации зазоров в зубчатых передачах, а также напряженных беззазорных соединений шестерен и муфт с валами (например, качественная штифтовка, посадки на конус и т. д.).

2. Обеспечение наибольшей величины ускорений. Это достигается как применением быстродействующего привода, так и снижением приведенного момента инерции механизма подач путем выбора оптимального передаточного отношения и уменьшения момента инерции подвижных деталей.

3. Обеспечение высокой жесткости механизмов подач для повышения их собственной частоты. Повышение жесткости кинематики цепи достигается применением шариковой винтовой передачи с предварительным натягом (улучшает контактную жесткость), гидростатической винтовой передачи с предварительным натягом подшипников в опорах, жесткой конструкцией кронштейнов, передающих осевую силу станине и исполнительному органу.

4. Уменьшение сил сухого трения в направляющих, передачах, опорах и обеспечение плавности перемещения при малых скоростях, при скачкообразном изменении скорости, при больших инерционных массах и перемен-

ных нагрузках при резании, — все это может быть достигнуто применением направляющих станин и винтовых пар с трением качения, а также применением гидростатических направляющих.

5. Исключение резонансов элементов механизма подач и всей системы привода с возмущающим воздействием (частотами врезания зубьев фрезы, вращения фрезы, следования управляющих импульсов и т. п.). Полоса пропускания следящего привода для легких станков должна быть не менее 20 Гц. Собственные частоты всех элементов механизма подач и станка следует принимать в 3,5 раза выше полосы пропускания привода.

6. Выполнение механизмов подач отдельных координат с идентичными характеристиками.

7. Уменьшение износа механических узлов и повышение стабильности параметров привода. Преимущества в этом случае имеют направляющие качения.

8. Уменьшение нагрева элементов привода.

9. Допустимая погрешность при окончательной обработке не должна превышать ± 10—30 мкм. Точность измерительных и отсчетных устройств берется на порядок выше.

10. Элементы современной вычислительной техники должны позволять обрабатывать импульсную информацию с частотой 3000—5000 Гц. Если принять для средних станков цену импульса 5 мкм, то при частоте следования импульсов программы 500 Гц линейная скорость рабочих органов должна быть 1,5 м/мин. Для тяжелых станков при цене импульса 50 мкм линейная скорость должна быть 15 м/мин. Учитывая вышеперечисленные цифры, необходимо сделать вывод, что производительность металлорежущих станков не ограничивается степенью быстродействия вычислительных устройств ЧПУ, а определяется исходя из чисто технологических соображений.

11. Программную информацию для систем ЧПУ целесообразно подготовлять на универсальных вычислительных машинах, автоматизирующих процесс подготовки программы. Объем исходной информации должен быть минимальным. Информация должна поддаваться визуальному контролю и исправлению на рабочем месте. Исходя из изложенных выше требований информацию желательно записывать на перфолентах.

12. В качестве воспроизводящих устройств в системах ЧПУ для точной обработки деталей целесообразно применять устройства с замкнутой цепью управления.

13. Надежность систем ЧПУ должна быть выше надежности универсальных математических машин.

14. Для получения надежных систем ЧПУ, состоящих из большего числа элементов, надежность которых недостаточна, используют принцип ограниченного дублирования. Ограниченное дублирование обеспечивает заданную степень надежности, но одновременно резко усложняет систему ЧПУ, что требует для обслуживания таких систем высококвалифицированного обслуживающего персонала, так как выходящие из строя блоки необходимо ремонтировать и настраивать для последующего их использования в качестве дублеров.

15. Разрешающая способность и точность датчиков обратной связи (чувствительных элементов) должны быть высокими (т. е. должны быть малые собственные ошибки). Рабочие характеристики датчиков должны быть линейными. Одновременно с этим для датчиков должны выполняться следующие условия: они должны иметь высокую надежность, малую инерционность и малый момент трения.

16. К усилителям систем ЧПУ предъявляют самые разнообразные требования: должны быть обеспечены большой коэффициент усиления, линейность рабочих характеристик, высокая надежность, малая нестабильность, малая инерционность, низкий уровень шумов и высокая чувствительность, стабильность выходных характеристик во времени, определенная амплитудно-частотная характеристика.

17. В качестве исполнительных двигателей в станках с ЧПУ применяют электрические двигатели постоянного тока, гидродвигатели, гидроцилиндры и шаговые двигатели. Исполнительные двигатели должны удовлетворять следующим требованиям: иметь малые габаритные размеры и вес, допускать широкий диапазон регулирования, большую перегрузку; для гидродвигателей и гидроцилиндров могут иметь место малые утечки жидкости, малую зависимость от температуры, а также высокую надежность.

18. Удобство в эксплуатации и надежная техника безопасности систем ЧПУ являются также важными требованиями, предъявляемыми к ним.

19. Техническая документация на станки и системы ЧПУ должна быть проста, удобна и в достаточной степени пояснять и иллюстрировать работу системы, а также работу отдельных блоков, узлов и элементов.

Глава II

Основные погрешности и характерные неисправности элементов станков с ЧПУ и систем их управления

В каждую систему числового программного управления, кроме силовых исполнительных двигателей (гидравлических или электрических), входят узлы, которые влияют на качественную работу системы. Эти узлы и блоки определяются схемой и типом следящего привода и включают в себя усилительные, преобразующие и корректирующие блоки, чувствительные элементы, управляющие элементы и т. д. Рассмотрим погрешности, неисправности и типовые отказы всех элементов, узлов и блоков некоторых систем станков с ЧПУ. С этими вопросами приходится сталкиваться эксплуатационному персоналу, и знание их позволяет, с одной стороны, упростить отладку таких систем, а с другой — повысить их эксплуатационную надежность.

§ 1. МАГНИТНАЯ ЛЕНТА

В процессе магнитной записи среда, способная намагничиваться (носитель записи), движется с постоянной скоростью мимо магнитного устройства (записывающей головки), которая создает намагниченность носителя программы, пропорциональную току, проходящему по обмотке магнитной головки. Таким образом, изменение тока во времени записывается на магнитной ленте (магнитоносителе) как изменение остаточной намагниченности по длине ленты. Эта переменная намагниченность образует магнитные поля вокруг носителя, которые при прохождении ленты мимо воспроизводящей головки наводят потоки в ее обмотке, пропорциональные остаточной намагниченности ленты.

В процессе воспроизведения записанной программы изменение потока индуцирует э. д. с. в обмотке воспроизводящей головки.

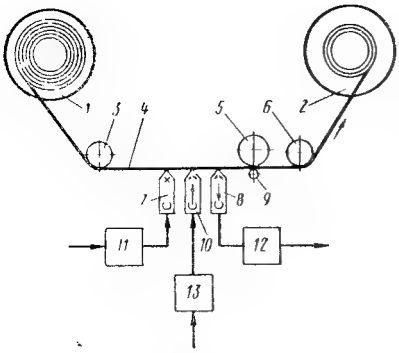


Рис. 9. Схема устройства записи сигналов на магнитную ленту

Для случаев записи и воспроизведения сигналов на магнитной ленте, рассмотрением которых мы и ограничимся, устройство может иметь вид, показанный на рис. 9.

Магнитная лента с подающего рулона *1*, направляемая роликами *3* и *6*, перематывается на рулон *2*. Лента *4*, прижимаемая роликом *5* к ведущему валу *9*, движется в указанном направлении мимо трех головок, первая из которых — стирающая *7*, уничтожает с помощью генератора переменного тока *11* все, что было ранее записано на ленте, и подготовляет ее для регистрации новой остаточной намагниченности при помощи усилителя *13* и записывающей головки *10*. Воспроизводящая головка *8* может воспроизвести запись, сделанную головкой *10*, и усилить сигнал с помощью усилителя *12*.

Для систем станков с ЧПУ, как правило, используется та же схема, но без стирающей и записывающей головок.

Скорость протягивания ленты зависит от назначения записи и типа воспроизводящих устройств, применяемых в системах ЧПУ станками; она может быть 50, 100 или 200 мм/с. В практике магнитной записи известны ленты двух типов — сплошные, когда магнитный порошок равномерно наполняет немагнитный носитель, и двухслойные, когда тонкий слой магнитного порошка наносится на основу из немагнитного материала. Толщина магнитных лент, применяемых для станков с системами ЧПУ, колеблется от 35 до 150 мкм, ширина 35 мм.

Магнитный носитель, применяемый для магнитных лент, состоит обычно из магнитного порошка Fe_2O_3 или окиси кобальта. Размер частиц порошка в среднем менее 1 мкм.

Современные способы записи электрических сигналов на магнитную ленту различают по положению записывающей головки относительно носителя записи (магнитной ленты). Существуют три способа магнитной записи: запись с продольным намагничиванием, запись с попереч-

ным намагничиванием в глубь магнитного носителя и запись с перпендикулярным намагничиванием. В настоящее время для систем ЧПУ с магнитной лентой применяют магнитные головки для продольного намагничивания магнитной ленты. Запись, при которой направление основного магнитного поля в рабочем зазоре записывающей головки параллельно направлению записи, называется записью с продольным намагничиванием. Такой способ записи показан на рис. 10, *а*.

Применяемые головки для продольной записи выполняются на кольцевых сердечниках.

Магнитная лента *2* проходит перед рабочим зазором *1* магнитной головки, состоящей из магнитного сердечника *3* с высокой магнитной проницаемостью и обмотки *4*, наложенной на этот сердечник. Записываемый сигнал после усиления до необходимого уровня поступает в обмотку *4* магнитной головки, в зазоре которой при этом возникают в такт с колебаниями записываемого сигнала колебания напряженности магнитного поля. Переменное магнитное поле действует на ферромагнитное вещество магнитной ленты и изменяет его магнитное свойство. В результате в магнитной ленте возникает остаточное намагничивание, изменяющееся вдоль его длины и соответствующее записываемому сигналу.

Сердечник головки имеет незначительное магнитное сопротивление, однако в рабочем зазоре сердечника возникает магнитное рассеяние, так как сопротивление воз-

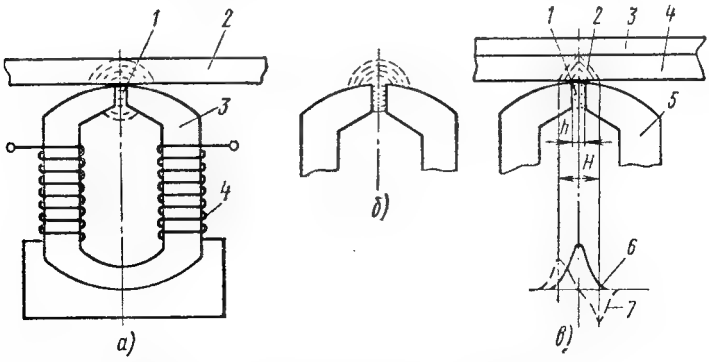


Рис. 10. Запись сигналов на магнитную ленту:

а — схема головки; *б*—схема магнитно-силовых линий при отсутствии магнитной ленты; *в* — схема магнитно-силовых линий при наличии магнитной ленты

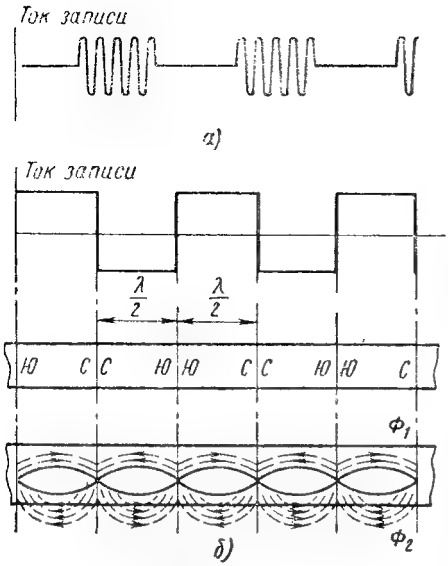


Рис. 11. Способы записи сигналов на магнитную ленту:

а —запись частотно-модулированного сигнала; *б*—запись синусоидального сигнала

душного (рабочего) зазора велико. Распределение магнитного поля над зазором головки показано на рис. 10, *б* при отсутствии магнитной ленты, и на рис. 10, *в* с магнитной лентой. Силовые линии *1* идут путем наименьшего сопротивления, т. е. в материале магнитной ленты. По ходу силовых линий на рис. 10, *в* видно, что совместно с продольным намагничиванием появляется и поперечное *2*. Силовые линии идут не только вдоль зазора, но и, выходя из сердечника *5*, входят в ферромагнитный материал магнитной ленты *4* перпендикулярно плоскости ленты *3*. Величина продольной составляющей магнитной индукции изображается кривой *6* на рис. 10, *в*, величина поперечной составляющей дана штриховой линией *7*. Исключительно продольное намагничивание получается только в центре зазора. Как видно из рис. 10, *в*, эффективная «ширина» зазора H больше, чем его действительные размеры h, так как силовые линии поля входят в материал магнитной ленты перед зазором h, а возвращаются в сердечник *5* за зазором.

Ознакомимся с двумя способами записи сигналов на магнитную ленту. Один из способов записи называется частотно-модуляционным. На рис. 11, *а* изображена частотно-модуляционная форма записи сигналов. При этом способе на магнитном носителе (магнитной ленте) записываются импульсы, промодулированные сигналами высокой частоты. При воспроизведении такого импульса получается «пакет» сигналов. При считывании программы, записанной в такой форме, получается чередование «пакетов» с определенной частотой и скважностью, при этом каж-

дому сигналу (импульсу) в системе управления соответствует элементарное перемещение рабочего органа станка. При такой форме записи сигналов выделение прямоугольного сигнала записи облегчено. Кроме того, дефекты ленты, которые удаляют ее от поверхности головки при записи, не вызывают ошибки в положении сигналов.

Второй способ записи рассмотрен на рис. 11, *б*. Явления, происходящие в магнитной ленте, можно представить как случай записи синусоидального сигнала с длиной волны λ в виде цепочки элементарных магнитиков, ориентированных навстречу друг другу. Длина отдельных магнитиков равна половине длины волны. Магнитный поток внутри ленты обозначен на рис. 11, *б* Φ_1, в воздухе — через Φ_2. Более подробные описания способов записи даны в работах [16, 23].

Одним из главных технических и экономических достоинств применения магнитной записи в системах ЧПУ является возможность на одном отрезке ленты многократно воспроизводить, стирать и записывать вновь информацию. К недостаткам надо отнести влияние на нее внешней среды (температуры, влажности, магнитных полей); довольно быстрый износ магнитного слоя; абразивное воздействие магнитного слоя на элементы лентопротяжного механизма; необходимость специальной аппаратуры для записи программ на ленту.

При длительном повторном использовании ленты ее свойства могут ухудшаться настолько, что она уже не будет отвечать предъявляемым к ней требованиям. Момент, начиная с которого лента считается изношенной, наступает в разное время в зависимости от типа ленты и цели ее применения. Износ может наступить по естественным причинам, например вследствие истирания ленты в процессе эксплуатации, или преждевременно — вследствие случайного повреждения.

Износ происходит вследствие скольжения рабочего слоя, основы, а также краев ленты по головкам, направляющим и другим неподвижным поверхностям лентопротяжного механизма. Можно предположить, что ухудшение свойств ленты вызывается не только происходящим соскабливанием рабочего слоя. Большей частью причиной ухудшения свойств магнитной ленты является постоянное осаждение продуктов истирания на поверхности магнитной ленты (например, материала магнитной головки, направляющих, а также мельчайших частиц рабочего

слоя и основы). Продукты истирания могут собираться также на любой неподвижной поверхности, например на магнитной головке, в виде комочков. В определенный момент под влиянием давления ленты, ее скорости и повышения температуры при движении комочек может прилипнуть к поверхности ленты. Частицы с краев ленты и ее нерабочей стороны могут попасть на рабочий слой при намотке ленты на катушку. Комочки образуют промежуточный слой между лентой и головкой, ухудшая рабочие свойства ленты. При интенсивном осаждении продуктов истирания количество комочков на поверхности ленты может быть столь большим, что рабочий слой уже не будет контактировать с магнитной головкой.

При импульсной записи комочки, достигая значительного размера, вызывают выпадение сигнала, что усугубляется еще больше при низких скоростях протягивания магнитной ленты в лентопротяжных механизмах. При аналоговой записи комочки увеличивают выпадение, усиливают модуляционный шум, создают неоднородность воспроизводимых сигналов, вносят фазовые искажения, а также ухудшают частотную характеристику.

Степень удаления магнитного носителя от магнитной головки влияет на пространственные потери, измеряемые в децибелах [42]:

$$K_a = 55 \frac{a}{\lambda},$$

где λ — длина волны в мм; a — зазор между носителем и магнитной головкой в мм.

Пространственные потери показывают, на сколько уменьшается уровень воспроизводимого сигнала с длиной волны при наличии зазора a между магнитным носителем и магнитной головкой.

Обычный процесс износа является кумулятивным. Наличие комочков на поверхности ленты ускоряет дальнейший процесс осаждения продуктов истирания. Таким образом, однажды происшедшее стабильное выпадение сигнала влечет за собой все новые и новые выпадания.

При начавшемся износе магнитной ленты чрезвычайно трудно восстановить ленту, поскольку комочки настолько плотно и прочно прилипают к ее поверхности, что почти любая очистка бесполезна. Факторами, определяющими длительность работы ленты до наступления износа, являются прочность рабочего слоя, его адгезия с основой,

шероховатость поверхности, коэффициент трения, температура размягчения или плавления связующего вещества (смолы), степень жесткости или мягкости края ленты, а также рабочие условия, например: скорость ленты, натяжение, температура и влажность окружающей среды, гладкость неподвижных частей, с которыми соприкасается лента в аппарате.

Степень загрязнения ленты жидкостями (маслами), пылью окружающей среды, металлической стружкой и т. п. также оказывает серьезное влияние на износ магнитной ленты.

Немаловажным фактором при работе с магнитной лентой является и то, как обращается с ней оператор и как хранится лента. Чаще всего повреждения магнитной ленты возникают при сочетании неправильного обращения и хранения.

Менее частыми причинами повреждения магнитной ленты является захват ленты бортиками направляющих роликов. Неправильно отрегулированный лентопротяжный механизм также может вызвать преждевременный выход из строя магнитной ленты. При намотке и перемотке магнитной ленты на катушку, если рулон намотан плотно, а несколько витков ленты выступают наружу, они могут быть повреждены или деформированы. Если натяжение ленты при перемотке (намотке) недостаточное, то в результате этого рулон будет свободно перемещаться по боковым ограничителям лентопротяжного механизма, что также приведет к повреждению краев ленты. При слабом натяжении витков ленты в рулоне они под действием тангенциальных сил могут смещаться относительно друг друга, это происходит в момент пуска и останова лентопротяжного механизма или при транспортировке ленты. На участках с малым натяжением сила, вызывающая ускорение, преодолевает трение между витками рулона, и витки, проскальзывая, образуют складки (рис. 12). Складки, отдаляя в рабочем режиме ленту от головки, являются причиной выпадания сигналов.

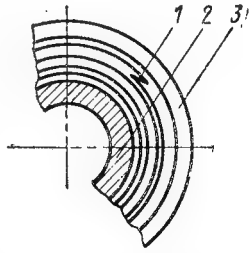


Рис. 12. Образование складок в рулоне с лентой:

1 — складка; *2* — катушка; *3* — слой ленты

Если на неподвижных частях лентопротяжного механизма, с которыми соприкасается магнитная лента,

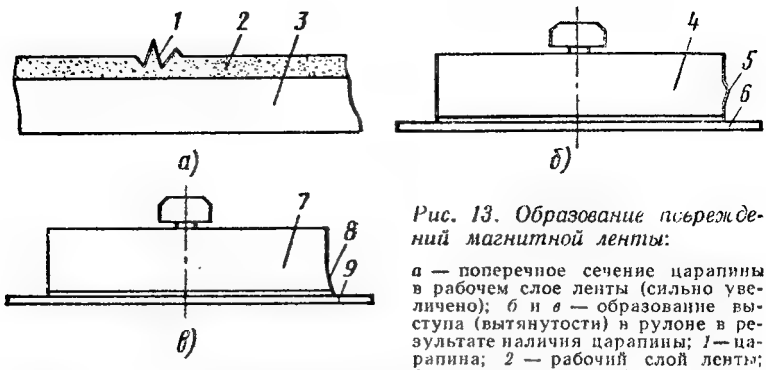


Рис. 13. Образование повреждений магнитной ленты:

а — поперечное сечение царапины в рабочем слое ленты (сильно увеличено); *б* и *в* — образование выступа (вытянутости) в рулоне в результате наличия царапины; *1* — царапина; *2* — рабочий слой ленты; *3* — основа ленты; *4* и *7* — рулон (бобина) ленты; *5* и *8* — выступы (вытянутости) магнитной ленты в результате повреждения; *6* и *9* — боковые ограничители магнитной ленты

имеется выступ или царапина, то рабочий слой будет поврежден (рис. 13, *а*). На месте повреждения (царапины) происходит дополнительное осаждение частиц рабочего слоя, вызывающее выпучивание ленты (рис. 13, *б*, *в*). Таким образом, небольшая царапина на одном витке может повториться в виде выступа во всем рулоне и быть причиной еще большей деформации внешних слоев ленты. Например, выступ высотой приблизительно 0,25 мкм, повторяясь во всех витках рулона (1000 м), во внешнем слое имеет высоту 0,75 мм. Даже при нормальных условиях хранения это вызывает значительную деформацию и отсутствие контакта между лентой и магнитной головкой. Если деформация возникла на краю ленты и натяжение недостаточное, край станет волнистым. Это особенно нежелательно, поскольку краевые дорожки считывающей магнитной головки теряют контакт с лентой раньше, чем центральные.

Деформация ленты может вызываться также мелкими частицами пыли, металлической стружки и другими частицами, которые неизбежно попадают на магнитную ленту в процессе работы на металлорежущих станках.

Большое значение при воспроизведении информации с магнитной ленты имеют место и другие виды потерь, такие как: саморазмагничивание, вихревые и щелевые потери, слойные потери и копир-эффект и др. [7, 16, 23, 42].

§ 2. ВОСПРОИЗВОДЯЩИЕ УЗЛЫ (МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ)

Воспроизведение записанных на магнитной ленте сигналов в системах ЧПУ производится магнитными головками. В этих системах широко применяют магнитные головки индукционного типа. В общем случае от воспроизводящих магнитных головок требуется качественное считывание информации с ленты, достаточная величина полезного сигнала, превышающая величину сигнала помехи, и большая долговечность самой головки.

Распределение магнитных силовых линий элементарных магнитиков ленты в присутствии воспроизводящей магнитной головки приведено на рис. 14, *а*. На рис. 14, *б* показан воспроизведенный магнитной головкой сигнал, записанный в виде прямоугольной формы. Как видно из рисунка, значительная часть внешнего потока элементарных магнитиков ленты замыкается через тело магнитной головки вследствие ее весьма высокой магнитной проницаемости. На рис. 14, *в* показано воспроизведение сигнала, записанного в виде синусоидальной формы.

Наличие воздушного зазора в магнитной головке приводит к тому, что часть магнитного потока одного из элементарных магнитиков проходит через весь магнитопровод головки, наводя в ее обмотке электродвижущую силу.

Распределение магнитных силовых линий зависит от отношения ширины щели к толщине магнитного слоя ленты

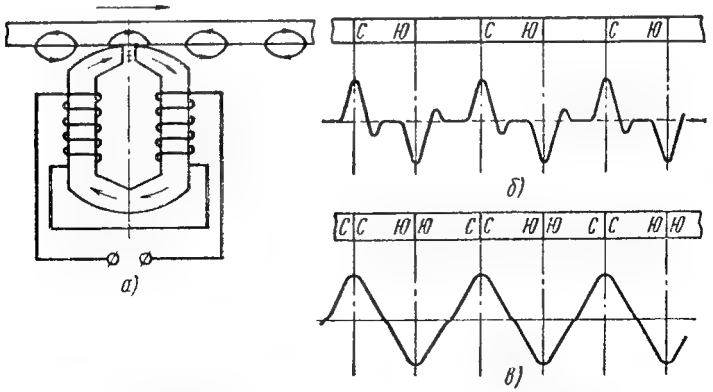


Рис. 14. Воспроизведение сигналов с магнитной ленты:

а — магнитная головка с магнитной лентой; *б* — форма воспроизводимого сигнала, записанного в виде прямоугольной намагниченности; *в* — форма воспроизводимого сигнала, записанного в виде синусоидальной намагниченности

и от расстояния этого слоя до поверхности головки. При непосредственном контакте ленты с головкой магнитный поток близлежащих к головке слоев будет больше вследствие уменьшения размагничивающего фактора при замыкании элементарных магнитиков магнитной головкой.

Часть магнитного потока (около 25%), вошедшего в тело головки, не пересекает витки ее обмотки, а замыкается через воздушный зазор благодаря его более значительной магнитной проницаемости по сравнению с проводимостью тела самой головки. Это приводит к падению чувствительности головки. Поэтому щель делают не менее 5—10 мкм. Магнитный поток, проходящий через головку, примерно равен магнитному потоку, выходящему из элементарного магнитного штриха при расположении щели на его середине. При смещении щели к концу этого магнитика поток, проходящий через головку, равен нулю, так как обе части магнитопровода по обе стороны щели будут контактироваться одним и тем же полюсом элементарного магнитика. Таким образом, если не учитывать шунтирующее действие зазора, то магнитный поток, проходящий через головку при наличии зазора конечной величины, может быть выражен как разность магнитных потоков, входящих в каждый полюс магнитной головки.

Если магнитный поток, пронизывающий головку при движении магнитной ленты с записанной на ней информацией, изменяется по строго определенному закону, то, опуская математический вывод, можно определить э. д. с., наводимую в обмотках магнитной головки. Согласно закону электромагнитной индукции э. д. с. может быть вычислена по формуле

$$E = 2\pi f \Phi w,$$

где E — действующее значение э. д. с. в В;
Φ — эффективное остаточное значение магнитного потока в вб;
f — частота записанного сигнала в Гц;
w — число витков обмотки магнитной головки.

Чувствительностью магнитных головок индукционного типа называется э. д. с., развиваемая головкой при воспроизведении записи определенного уровня. Для того чтобы исключить влияние различного рода потерь, определяемых другими характеристиками головки, чувствительность измеряют на частотах не выше 1000 Гц; при такой частоте записи сигналов потери в головке мини-

мальны. Низкоомные головки, предназначенные для воспроизведения записи с продольным намагничиванием на магнитных лентах, развивают э. д. с., равную 1,5—2 мВ, а высокоомные, применяемые в системах ЧПУ, 10—15 мВ.

Напряжение, снимаемое с обмоток магнитной головки, в 10—15 мВ обычно обеспечивает надежную работу тракта воспроизведения в системах управления станками с ЧПУ. Вполне удовлетворительная работа имеет место и при величине сигнала, наведенного в магнитной головке, в 2—3 мВ, при этом, однако, возрастает опасность воздействия на систему воспроизведения сигнала помехи, возникающей от включения электрооборудования станка, при неправильном монтаже цепей магнитной головки, при наличии вблизи от магнитной головки сильных электромагнитных полей.

Для исключения возникающей помехи стремятся ввести экранировку магнитных головок с помощью специальных экранов, выводы с головок выполняют из экранированного провода. При монтаже силовых электрических цепей в системах ЧПУ, которые могут быть источником сильных электромагнитных полей, их или не прокладывают вблизи цепей магнитной головки или создают мощную экранировку этих цепей.

Одним из условий надежного считывания информации с магнитной ленты головкой является то, что полоса пропускаемых частот должна быть ограничена; так, например, для фазовых систем ЧПУ полоса частот для магнитной головки выбирается порядка 200—300 Гц синусоидальной формы сигнала, а при импульсной записи частота «пакетов», модулированных частотой 2500 Гц синусоидальной формой, не превышает 1000 Гц. Исходя из этих условий передний зазор магнитных головок для систем ЧПУ находится в пределах 10—30 мкм.

С конструктивной точки зрения различают однодорожечные, многодорожечные, одинарные и сдвоенные магнитные головки.

В системах ЧПУ применяют в основном одинарные многодорожечные магнитные головки. На рис. 15 изображена конструкция типовой магнитной головки для контактного воспроизведения с магнитной ленты. Магнитная головка состоит из двух соединенных между собой полублоков *1*. Пакеты сердечников *7*, которые обычно набирают из пластин магнитомягкого материала — пермал-

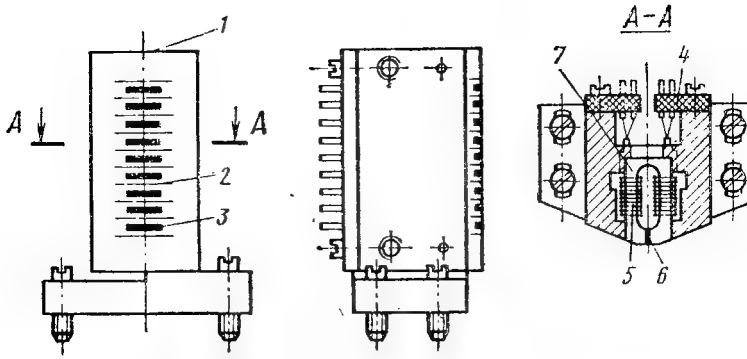


Рис. 15. Конструкция многодорожечной воспроизводящей магнитной головки типа ГМ-35/9

лоя, вместе с намотанными на них обмотками *5* крепятся в специальных прорезях полублоков. Перед окончательным соединением полублоков, в момент сборки, между сердечниками со стороны рабочей поверхности вставляют прокладку *6* из немагнитного материала (обычно фольга из бериллиевой бронзы), образующую передний (рабочий) зазор головки. Многодорожечную одинарную магнитную головку можно рассматривать как состоящую из элементарных головок *3*. Элементарные головки отделены друг от друга экранами *2*, которые вставляют в прорези полублоков. Выводные концы обмоток элементарных головок припаивают к клеммной колодке *4*. После сборки полублоков их штифтуют и окончательно шлифуют и доводят рабочую поверхность головки.

В многодорожечной магнитной головке вследствие наличия рабочего и дополнительного (заднего) зазоров потоки рассеяния, кроме снижения чувствительности, вызывают паразитную магнитную связь между элементарными головками. Этим и обусловлена установка экранов из материала с высокой магнитной проницаемостью между элементарными магнитными головками.

В процессе эксплуатации контактных магнитных головок происходит увеличение э. д. с. считывающей головки, так как вследствие износа уменьшается глубина рабочего зазора, а следовательно, повышается его магнитное сопротивление. Но наряду с увеличением возможно и уменьшение э. д. с. считываемого сигнала с магнитного носителя. Это обусловлено пространственными, щелевыми и частотными потерями.

Пространственные потери были определены соотношением

$$K_a = \frac{a}{\lambda},$$

и если заменить длину волны λ на выражение $\frac{v}{f} = \lambda$, где v — скорость движения магнитной ленты в мм/с; f — частота записанного сигнала в Гц, то пространственные потери определятся следующей формулой:

$$K_a = 55\,\frac{af}{v}.$$

Щелевые потери зависят от соотношения между длиной волны записанного сигнала и размерами щели рабочего зазора. Первое определяется плотностью записи сигналов на магнитной ленте, второе — конструкцией воспроизводящей головки. В случае равенства длины волны записанного сигнала и размеров щели рабочего зазора головки, э. д. с., наведенная в обмотках головки, будет примерно равна нулю; если длина волны равна половине длины рабочей щели, э. д. с. будет равна максимуму наведенной э. д. с.

Это показано на рис. 16, где изображена часть головки воспроизведения в увеличенном виде. К рабочему зазору примыкает магнитная лента с записью одного периода λ высокой частоты, длина которого равна ширине зазора. Из рисунка видно, что к наконечникам сердечника головки обращены два одноименных полюса элементарных магнитиков ленты. Так как магнитные силовые линии одноименных полюсов взаимно отталкиваются, то магнитные потоки элементарных магнитиков замкнутся по кратчайшему пути через воздух, и в сердечнике головки

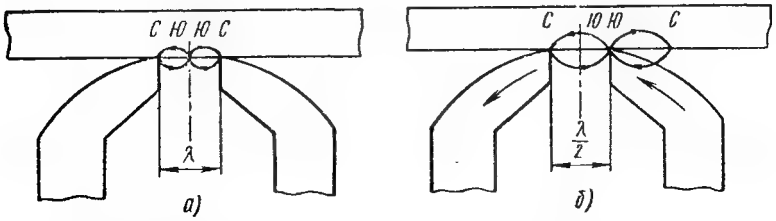


Рис. 16. Щелевые потери:

а—при длине волны сигнала, равной рабочему зазору; *б* — при длине волны сигнала, равной двум рабочим зазорам

магнитного потока не будет. Следовательно, напряжения (э. д. с.) на обмотках головки тоже не будет, и запись не воспроизведется, несмотря на то, что на ленте она есть. Если же к рабочему зазору примыкает лента с записью одного полупериода $\frac{\lambda}{2}$ высокой частоты (рис. 16, *б*), то к наконечникам сердечника головки обращены разноименные полюса элементарного магнитика. Магнитный поток элементарного магнитика замкнется через сердечник головки и пройдет по нему. Следовательно, напряжение на обмотке головки будет максимальным и запись будет воспроизведена.

Частотные потери, обусловленные вихревыми токами в сердечнике, не только снижают э. д. с. в считывающей головке, но и служат причиной искажения формы считываемого сигнала.

Неправильная ориентация рабочего зазора считывающей головки по отношению к направлению записанного сигнала на магнитной ленте служит одной из причин потерь уровня сигнала при считывании. Если зазоры записывающей и считывающей головок по-разному наклонены к базовой кромке ленты, наблюдаются высокочастотные потери сигнала. Случай неправильной установки считывающей головки (при правильно установленной записывающей головке) показан на рис. 17, *б*, когда рабочий зазор составляет некоторый угол Θ с перпендикуляром, проведенным к базовому краю магнитной ленты, (для наглядности на рис. 17, *а* изображена достаточно ши-

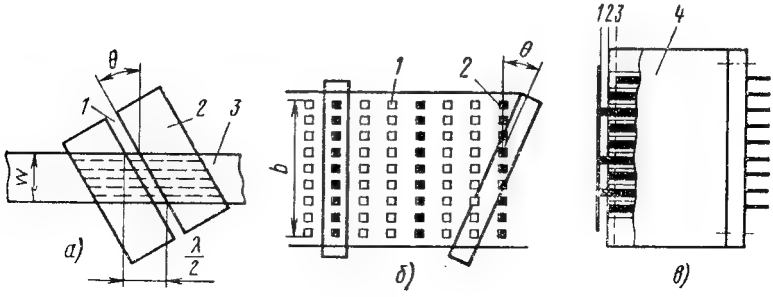


Рис. 17. Неправильная ориентация рабочего вазора магнитной головки:

а — элементарной; *1* — рабочий зазор; *2* — полюсные наконечники; *3* — магнитная лента; *w* — ширина магнитной записи; *б* — многодорожечной: *1* — элементарные магнитики (магнитная запись); *2* — осевая линия рабочего зазора; *в* — неправильная установка магнитных головок (элементарных) по линии переднего зазора

рокая дорожка записи информации на магнитной ленте при малой длине волны записанного сигнала). Подобная же ситуация может возникнуть при угловом смещении записывающей головки или при смещении записывающей и воспроизводящей головок одновременно на разные углы. То же самое может наблюдаться и при угловом смещении магнитной ленты относительно магнитной головки при протягивании ленты в лентопротяжном механизме.

Для многодорожечных магнитных головок неправильная ориентация рабочих зазоров усугубляется наличием еще больших потерь, кроме рассмотренных выше, так как в таких головках для увеличения сигнала при считывании информации с одного канала применено попарное последовательное соединение обмоток элементарных головок.

Если ширину ленты b условно можно разбить на множество элементарных дорожек с индивидуальной головкой на каждой из них, то считывающую головку можно рассматривать как состоящую из множества отдельных элементарных головок, каждая из которых пронизывается магнитным потоком в тот момент, когда ее зазор находится непосредственно над магнитным отпечатком. Так как каждая элементарная головка пересекается магнитным отпечатком в разные моменты времени, то полный магнитный поток последовательно соединенных обмоток магнитных головок можно рассматривать как сумму потоков от каждой элементарной головки. Максимальный поток будет пронизывать сердечник магнитной головки в случае, если угол наклона $\Theta = 0$, при этом будет считан максимальный сигнал.

Для примера, приведенного на рис. 17, *б*, в случае углового смещения, равного Θ, не превышающего величины $\frac{\lambda}{2}$, это не вызовет больших фазовых искажений, хотя амплитуда считываемого сигнала будет уменьшаться до нуля при равенстве углового смещения половине длины волны записанного сигнала. Если угловое смещение Θ превышает величину $\frac{\lambda}{2}$, но меньше, чем длина волны λ, то знак э. д. с. инвертируется и в результате появляются искажения сигнала. Это особенно может отразиться на работе фазовых систем ЧПУ, так как появление фазовых искажений в считанном сигнале приводит к искажению информации.

Помимо углового смещения, в многодорожечных магнитных головках (рис. 17, *в*) вследствие погрешности обработки рабочих плоскостей полублоков головки и ряда других технологических причин возникают дополнительные трудности по установке всех элементарных головок на одной прямой, называемой линией передних зазоров *2*. Расстояние между магнитной лентой *1* и элементарной магнитной головкой называется передним зазором. Критерием качества изготовления головки *4* служит расстояние между центральной линией *1* и линией максимального смещения *3*. В современных воспроизводящих головках, обеспечивающих считывание информации с высокой плотностью записи (50 имп/мм), смещение линии рабочих зазоров не должно превышать 2—3 мкм.

На погрешности считываемого сигнала для фазовых систем сказываются и колебания амплитуды сигналов из-за неравномерной чувствительности самой магнитной ленты.

Потери из-за непараллельности углов наклона рабочих зазоров у магнитных головок записи и воспроизведения можно определить по формуле (*1*). Если разница в углах $\Theta < \frac{\lambda}{2}$, то потери в дБ составляют

$$p_\Theta = 20 \lg \frac{\sin\left(\pi w \frac{\operatorname{tg}\Theta}{\lambda}\right)}{\pi w \frac{\operatorname{tg}\Theta}{\lambda}}, \qquad (1)$$

где p_Θ — потери в дБ;

λ — длина волны сигнала записи в мм;

Θ — угол смещения в град;

w — ширина дорожки записи в мм.

Немаловажную роль при эксплуатации систем ЧПУ с магнитными головками имеет и износостойкость головок. Объем стираемого материала сердечника в первом приближении пропорционален длине ленты, посредством которой производилось истирание. Коэффициент пропорциональности, или коэффициент истирания, служит характеристической величиной для материала сердечника головки и типа магнитной ленты. Коэффициент истирания пропорционален давлению ленты на головку и зависит от скорости движения ленты [42]. Коэффициент истирания определяется по объему истертого материала головки, приходящемуся на единицу длины магнитной ленты. Объем материала может быть найден по глубине

износа рабочей поверхности. Определив эти величины и зная скорость ленты в конкретном аппарате, угол обхвата головки лентой, а также форму и размеры рабочей поверхности, можно затем рассчитать срок службы головки в часах. По данным специалистов [42], коэффициент истирания для головок из пермаллоя в 10—15 раз больше, чем из вакадура. Истирание новой лентой в 1,5 раза больше, чем истирание лентой, бывшей в употреблении 3 раза и более.

§ 3. ЛЕНТОПРОТЯЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Для перемещения магнитной ленты в станках с системами ЧПУ служит лентопротяжный механизм, который подводит под магнитную головку заданный участок магнитной ленты. Лентопротяжный механизм должен иметь стабильную скорость перемещения ленты. Точность поддержания заданной скорости ленты определяется условием работы станков и она не должна выходить за предел $\pm 5\%$. В лентопротяжном механизме необходимо обеспечить малую инерционность ленты при разгоне и торможении (остановке). Должны быть сведены к минимуму все напряжения, возникающие при разгоне, остановке, передвижении, хранении ленты на устройстве и вне его, при установке на устройство и съеме, для того, чтобы они не приводили к повреждению ленты или ухудшению качества записанных сигналов. Устройство должно обеспечивать точность протягивания, т. е. точное направление магнитной ленты на всем тракте лентопротяжного механизма без перекосов и повреждений краев. Повреждение краев ленты — основная причина ее обрывов. Лентопротяжный механизм должен обеспечивать минимум вибрации ленты и надежный контакт между лентой и магнитной головкой. Наиболее широкое применение в станках с ЧПУ нашли лентопротяжные механизмы с двумя катушками; с одной из них лента сматывается, а на другую наматывается.

Рассмотрим лентопротяжный механизм с нерегулируемой скоростью протягивания ленты шириной 35 мм, применяемый в станках с ЧПУ импульсной системы.

Упрощенная кинематическая схема лентопротяжного механизма приведена на рис. 18. Рулон магнитной ленты *2* опирается на ограничители *1*. Во время работы магнитная лента *6* перематывается с одной катушки *3* на другую. Катушки установлены на валах *4* и *5* электродвигателей

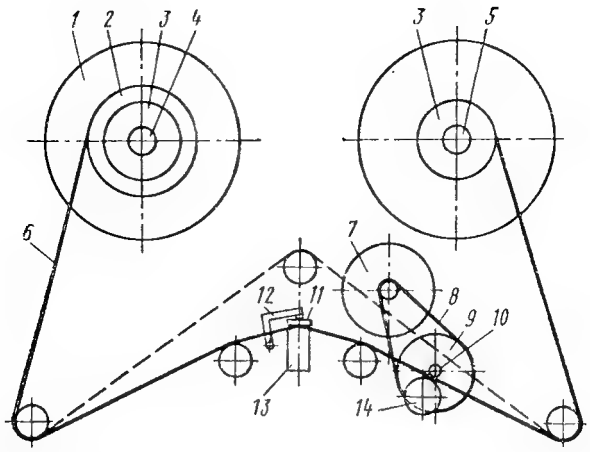


Рис. 18. Схема лентопротяжного механизма

типа ДПА-010/5-4М, которые являются асинхронными конденсаторными двигателями. Оба двигателя снабжены ленточными тормозами, которые управляются электромагнитом. При работе устройства в режиме воспроизведения программы магнитная лента с постоянной скоростью движется относительно магнитной головки *13*; ее перемещение осуществляется ведущим валом *10*, снабженным маховиком *9*, и прижимным роликом *14*, который также управляется электромагнитом. В качестве ведущего двигателя *7* используется асинхронный двигатель ДВА-4У (n = 695 об/мин), который через фрикционную передачу *8* вращает ведущий вал *10*.

В режиме воспроизведения магнитная лента, с целью уменьшения воздушного зазора, прижимается к магнитной головке колодкой *11*, управляемой с помощью рычагов *12* электромагнитом прижимного ролика. В этом режиме лента сматывается с левой катушки *3* и левый двигатель *4* при этом работает как электрический тормоз, обеспечивая необходимое натяжение ленты, правый вал двигателя осуществляет намотку ленты с необходимой плотностью на правую катушку. Крутящие моменты на валах двигателей *4* и *5* и, следовательно, величину натяжения ленты регулируют изменением напряжения на клеммах двигателей.

Обратная перемотка магнитной ленты производится на повышенной скорости левым валом двигателя, правый вал двигателя в этом режиме притормаживает ленту, при этом ведущий двигатель *7* отключается, а прижимной ролик *14*, рычаг *12* и колодка *11* отводятся от ленты пружиной. Одновременно рычаг *12* автоматически отводит ленту от магнитной головки и этим снижает истирание ее. При ускоренной перемотке «вперед» намотку осуществляет правый вал, а левый вал является тормозом.

Рассмотрим работу отдельных узлов лентопротяжного механизма и выясним причину возникновения при этом погрешностей и неисправностей. Наиболее распространенной конструкцией ведущего узла этого механизма является схема, состоящая из прижимного обрезиненного ролика и вала соединенного с двигателем непосредственно или через трансмиссию. Лента прижимается к валу свободно вращающимся обрезиненным прижимным роликом, который имеет ширину несколько большую, чем ширина магнитной ленты. В этом случае, так как сцепление ленты с резиной больше, чем с металлом, вращение передается от вала к прижимному ролику, а уже последний ведет за собой ленту. Поэтому точное значение скорости движения ленты может быть несколько больше окружной скорости ведущего вала и зависит это превышение от толщины магнитной ленты. Такая конструкция узла ведущего вала наиболее простая, но имеет ряд существенных недостатков. Любые периодические колебания скорости двигателя и его вибрации с частотами, кратными частоте питающей сети, непосредственно передаются ленте, вызывая соответствующие колебания ее скорости. Эксцентриситет ведущих валов и прижимных роликов порождает неравномерность окружной скорости вала и неоднородность тягового усилия, а следовательно, и неравномерность протягивания и натяжения ленты.

Для того чтобы исключить проскальзывание ленты, ее надо прижимать к ведущему валу достаточно сильно с большим углом обхвата, а это приводит к сминанию резины и быстрому износу прижимного ролика. Изменения скорости при этом станут случайными или будут повторяться циклически за каждый оборот ведущего вала; появится переменная нагрузка на валу двигателя, которая будет иметь место на разных участках магнитной ленты, а это скажется на считывании информации. Применение резины на прижимном ролике которая в процессе

эксплуатации стареет и теряет свои упругие качества, приводит к тому, что при протягивании ленты могут произойти ее деформация или обрывы.

Колебания мгновенного значения скорости выражаются прежде всего во временно́м отклонении считываемых сигналов, записанных с постоянной, заранее известной частотой на магнитную дорожку. Смещение сигналов вызывает изменение считываемых сигналов по амплитуде и фазе относительно сигналов, приходящих от станка, что особенно сказывается на работе фазовых систем ЧПУ.

Намотка ленты на приемные катушки в лентопротяжном механизме с подтормаживанием обеспечивается установкой в подающем и приемном узлах отдельных двигателей, число оборотов которых может автоматически изменяться в широких пределах. Для того чтобы натяжение ленты сохранялось постоянным, требуется гиперболическая скоростная характеристика двигателя; так как на практике ее обычно нельзя достичь, приходится использовать специальные двигатели с применением особой электрической схемы.

Двигатель приемного узла должен быстро запускаться, чтобы при включении механизма не возникала петля ленты. При ускоренной перемотке на двигатель соответствующего узла подают полное напряжение, а на двигатель второго узла — небольшое напряжение для подтормаживания и натяжения ленты. Причем двигатель, с которого сматывается лента, включен и вращается в сторону, противоположную направлению сматывания ленты.

Важной задачей при эксплуатации подающего и приемного узлов является сохранение создаваемого ими натяжения вдоль всей длины магнитной ленты. Неравномерное натяжение ленты создает неравномерную нагрузку на ведущем валу и приводит к нестабильной скорости протягивания. Все это в конечном счете приводит к ненадежному воспроизведению программы, записанной на магнитной ленте.

Так как линию рабочих зазоров магнитных головок устанавливают перпендикулярно направлению движения ленты, то любая линия на ленте, перпендикулярная одному из краев ленты принятому за базовый, должна быть строго параллельна линии зазоров магнитной головки. Однако из-за неточности изготовления магнитных головок, подложек и установки их возникает непараллель-

ность между условной линией на ленте и линией рабочих зазоров головки. При этом непараллельность будет различной на различных лентопротяжных механизмах. Описанное явление называют перекосом ленты. При многодорожечной записи различают статический и динамический перекосы. Причиной динамического перекоса может быть колебание размеров ленты по ширине. Статический перекос обусловлен неправильной установкой направляющих роликов и стоек. При перекосах ленты характер дефекта имеет такой же вид, как при колебаниях мгновенного значения скорости движения магнитной ленты.

При эксцентриситетах направляющих роликов и обводных стоек возникает продольная вибрация ленты, а эксцентриситет катушек приводит к вибрации ограничителей ленты и неравномерности намотки ее на катушки.

При остановке ленты, во избежание набегания петель, запутывания и обрыва ленты необходимо тормозить только тот приемный или подающий узел, с которого сматывалась лента. В лентопротяжных механизмах ЧПУ для быстрого останова подматывающего и приемного узлов применены ленточные тормоза, которые установлены на маховиках двигателей подматывающего и приемного узлов. Основным недостатком применяемых тормозов является то, что они быстро загрязняются и не обеспечивают четкого торможения, так как прижим ленты к маховику двигателя осуществляется пружиной. За счет старения пружины ее сила уменьшается, а при загрязнении силу прижима ленточного тормоза необходимо увеличить.

В лентопротяжных механизмах систем ЧПУ имеют место и высокочастотные колебания магнитной ленты относительно головки, которые возникают из-за зернистости структуры магнитной ленты и трения ее о магнитную головку и другие неподвижные элементы механизма.

Низкочастотные колебания ленты в лентопротяжном механизме возникают из-за того, что для привода прижимного ролика применяют электромагниты переменного тока. Переменная составляющая электромагнита передается через систему рычагов на прижимной ролик, который передает эти колебания ленте, что вызывает ее детонацию при протягивании.

Нередко для обеспечения качественного прилегания магнитной ленты к головке применяют прижимные колодки на станках с ЧПУ типа 6Н13-ГЭ2, ГФ-770 и ФП-4 с системами управления типа ПРС-3К и «Контур-4МИ» приме-

нены такие прижимы. Применение прижимной колодки вызывает торможение ленты и увеличивает износ головки и ленты. Если учитывать, что лента движется по неподвижной части механизма, по прижиму, то все частицы, находящиеся на магнитной ленте, собираются на фетровой прокладке прижима. Прокладка быстро загрязняется и забивается ферромагнитными и другими частицами. Такое состояние прижима резко увеличивает его тормозящее действие и нередко приводит к повреждению магнитной ленты. Поэтому нецелесообразно применять такого вида прижимы. Более надежными прижимами являются вращающиеся.

§ 4. УСИЛИТЕЛИ

Усилители в системах ЧПУ применяют для преобразования и усиления электрических сигналов, считанных с магнитной ленты, и для преобразования и усиления управляющих сигналов в гидравлических, механических и электрических системах станка до величин, необходимых для управления рабочими органами станка. В настоящее время для усиления электрических сигналов с магнитной ленты применяют транзисторные усилители и только в первых моделях станков с ЧПУ применяли электронные ламповые усилители. Транзисторные усилители в отличие от ламповых обладают более высокой надежностью и экономичностью, малым весом и размерами, высоким коэффициентом усиления (по току и напряжению) и практически безынерционны. Но такие важные показатели станков с ЧПУ, как погрешность, чувствительность, форма переходного процесса, помехозащищенность, в значительной степени определяются свойствами и характеристиками применяемых в системах усилителей. Так как теория и конструкция транзисторных усилителей достаточно освещены в литературе [22], здесь будут рассмотрены только некоторые специфические особенности усилителей систем ЧПУ.

Усилители должны иметь плоскую амплитудную характеристику в заданной области частот, малый и фиксированный сдвиг фазы, не зависящий от уровня входного сигнала, малое выходное полное сопротивление и малый уровень шумов, высокий коэффициент усиления, стабильность выходных характеристик во времени, высокую надежность. По характеру влияния на работоспособность

и надежность усилителей параметры их можно условно разбить на две группы: схемные и предельные.

Схемными (функциональными) параметрами усилителей называют характеристики их свойств, которые определяют электрические режимы в схеме при заданных напряжениях источников питания, входных сигналов и условиях окружающей среды. Электрическими режимами являются статические и импульсные (включая переходные процессы) токи, напряжения, выходные мощности. Схемными параметрами для усилителей являются, например, сопротивление резисторов, емкость конденсаторов, коэффициент усиления транзисторов, напряжение насыщения и постоянная времени работы транзисторов, прямое и обратное сопротивления диодов, индуктивность рассеивания трансформаторов и т. п.

Предельными параметрами усилителей называют характеристики свойств деталей, определяющие предельно-эксплуатационные режимы, рекомендуемые для использования. При превышении допустимых режимов по предельным параметрам возникает опасность необратимых изменений схемных параметров, а также значительных изменений внутренней структуры, приводящих к неисправностям и повреждениям усилителей. Примерами предельных параметров являются максимально допустимые токи и напряжения, мощности рассеивания, температура переходов, корпусов и аналогичные параметры усилителей.

На рис. 19 приведена схема усилителя считывания управляющего сигнала фазовой системы ЧПУ, состоящего из четырех транзисторов типа П-14А. Транзисторы *Т1* и *Т3* являются усилительными, а транзисторы *Т2* и *Т4*, включенные эмиттерными повторителями, являются согласующими. Эти два каскада с общим усилением порядка 2000 охвачены глубокой обратной связью через сопротивление *R8*. Введение обратной связи повышает стабильность усиления настолько, что изменения параметров транзисторов и напряжения питания практически не сказываются на усилении. Выход этого усилителя подключен к транзистору *Т5* усилителю-ограничителю, на коллекторе которого развивается напряжение прямоугольной формы 5,4—6,0 В при входном сигнале 10 мВ; ограничение начинается при 2 мВ.

Для предотвращения резкого ухудшения или необратимых изменений электрических характеристик полупроводниковых усилителей, применяемых в системах

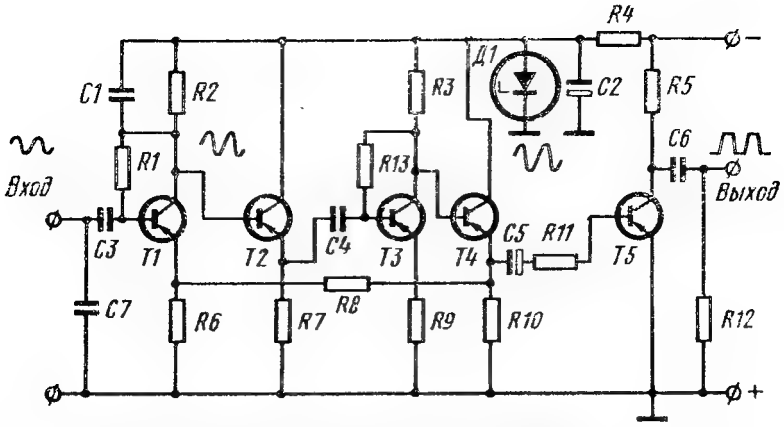


Рис. 19. Принципиальная схема усилителя считывания и усилителя-ограничителя при фазовой системе записи сигналов:

Т1, Т2, Т3, Т4 (типа П-14А), *Т5* (типа МП-41А)— транзисторы; *Д1*—стабилитрон Д813; *R1* (360 кОм), *R2* (9,1 кОм), *R3* (5,1 кОм), *R4* (300 Ом), *R5* (1 кОм), *R6* (100 Ом), *R7* (2 кОм), *R8* (подбирается), *R9* (100 Ом), *R10* (12 кОм), *R11* (510 Ом), *R12* (2 КОм), *R13* (360 кОм)—резисторы; *С1* (0,01 мкФ), *С2* (100 мкФ), *С3* (1 мкФ), *С4* (0,5 мкФ), *С5* (1 мкФ), *С6* (0,025 мкФ), *С7* (0,5 мкФ) — конденсаторы

ЧПУ, необходимо знать влияние на работу усилителей изменений электрических характеристик установленных транзисторов.

При современном уровне технологии не удается получить транзисторы с малым разбросом значений электрических параметров. Наибольший разброс имеют параметры $I_{ко}$ (обратный ток коллектора) и β (коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером). Разброс $I_{ко}$ достигает обычно десятикратного, а β — двух-пятикратного значений. С разбросом значений параметра связаны существенные различия семейств выходных статических характеристик в схеме с общим эмиттером транзисторов одного типа. Поэтому при замене транзисторов в схеме с общим эмиттером всегда следует учитывать конкретное значение параметра β для данной схемы.

При эксплуатации схем на транзисторах необходимо учитывать как возможный разброс значений параметров, так и дополнительные отклонения их, которые могут быть вызваны изменением рабочей точки, температуры и нестабильностью характеристик транзисторов. Изменения рабочей точки транзистора объясняются непосто-

янством напряжения источников питания, отклонениями допусков сопротивлений резисторов в цепях питания электродов транзистора и температурной зависимостью параметров самого транзистора (главным образом обратного тока).

Под нестабильностью характеристик транзистора понимаются отклонения в значениях тех или иных параметров транзисторов при их измерениях в одинаковых условиях (в одной и той же рабочей точке и при одинаковой температуре). Различают два вида нестабильности характеристик транзистора — «ползучесть» и температурную нестабильность. «Ползучестью» называют сравнительно быстрое изменение параметров транзисторов, наблюдающееся непосредственно после включения питания.

При питании нескольких усилителей от одного силового источника питания, особенно если полное сопротивление источника высокое, можно наблюдать такие явления: 1) эффект перекрестного воздействия, когда переходный режим одной управляемой координаты станка вызывает движение других; 2) все управляющие системы, присоединенные к общему силовому питанию, могут иметь колебания при низкой частоте, так как они вместе образуют многоконтурную систему. Для обеспечения качественной работы усилителей системы ЧПУ необходимо стабилизировать напряжение источника питания.

Одним из наиболее важных факторов, требующих к себе особого внимания при эксплуатации полупроводникового усилителя, является температура. Диапазон рабочих температур транзисторов определяется температурными свойствами p — n-переходов. Температура p — n-перехода, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды и от той электрической мощности, которая рассеивается в переходе в виде тепла. С изменением температуры транзистора фактически изменяются все его параметры. Особенно важной и в значительной степени нежелательной является зависимость от температуры обратного тока коллектора $I_{ко}$, величина которого определяется тепловой генерацией носителей (при низких температурах этот ток достигает насыщения). Ориентировочно можно считать, что обратный ток коллектора при повышении температуры на 10° С у германиевых транзисторов удваивается, а у кремниевых — утраивается. Изменение характеристик транзистора, вызванное изменением температуры, естественно приводит к зна-

чительным изменениям тока и усиления. Эта тепловая нестабильность, известная также как «тепловая обратная связь», является очень опасной для мощных транзисторов. Так, например, если вследствие какого-либо температурного воздействия внутри транзистора повышается рабочий ток, то благодаря этому будет повышаться окружающая температура (добавочный нагрев), что, в свою очередь, вызовет дальнейшее увеличение тока, и т. д. В результате транзистор начнет перегружаться и в конце концов выйдет из строя.

В устройствах импульсного управления станками с ЧПУ применяют следующие виды записи: 1) однополярную; 2) разнополярную; 3) запись импульсов, промодулированных синусоидальным сигналом.

При первом способе записи применяются простые схемы усилителей для считывания информации. Второй способ записи существенно усложняет схему усилителя, так как от схемы требуется способность различать полярность сигнала. Третий способ практически применен в станках с пультами управления типа ПРС-3-61 и ПРС-3К. Запись импульсов, промодулированных синусоидальным сигналом (импульсно-частотная запись), дает более надежное считывание сигналов с магнитной ленты. Использование несущего синусоидального сигнала позволяет сохранить прямоугольную форму огибающей без применения бистабильных формирователей, вследствие того, что при отсутствии несущей частоты магнитная головка дифференцирует прямоугольную огибающую так, что на ее зажимах будут лишь короткие импульсы от переднего и заднего фронтов огибающей (см. рис. 14, *б*).

Сигналы, записанные импульсно-частотным методом, считываются магнитной головкой, усиливаются и детектируются так, что на выходе усилителя считывания появляются сигналы прямоугольной формы.

Усилитель считывания импульсной системы изображен на рис. 20. Усилитель состоит из трех каскадов: первые два каскада осуществляют прямое усиление сигнала, третий — формирует импульсы прямоугольной формы со скважностью 2. Наряду с усилителями в системах управления станками с ЧПУ широко применяются элементы и устройства импульсной техники: триггеры, формирователи, логические элементы, мультивибраторы и др.

Для обеспечения надежной работы полупроводников в схемах импульсного управления станками необходимо

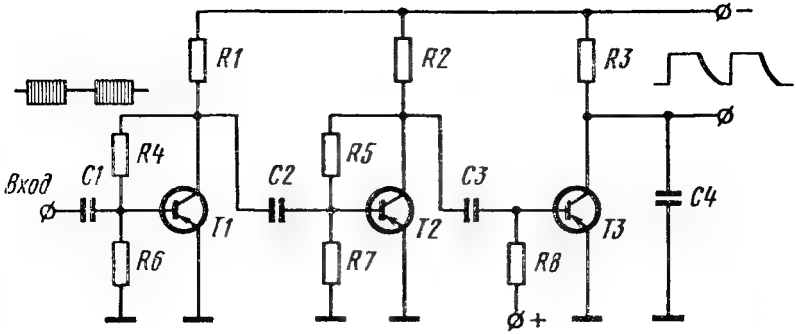


Рис. 20. Принципиальная схема усилителя считывания при воспроизведении сигналов с амплитудной модуляцией несущей частоты:

T1, T2, T3 (типа П-14) — транзисторы; *R1* (1 кОм), *R2* (10 кОм), *R3* (5,1 кОм), *R4* (100 кОм), *R5* (82 кОм), *R6—R8* (10 кОм) — резисторы; *C1—C3* (0,1 мкФ) *C4* (0,5 мкФ) — конденсаторы

учитывать, помимо влияния разброса и нестабильности параметров транзисторов, скачкообразное изменение их состояния, влияние формы сигнала на прохождение его через цепи усилителей и других элементов импульсной системы, бытродействие схемы и др.

Важнейшим требованием, предъявляемым к импульсным усилителям, является сохранение формы усиливаемого сигнала. Для выполнения данного условия они должны обладать возможно меньшими частотными и фазовыми искажениями, т. е. должны пропускать широкую полосу частот. Однако на практике искажения формы выходных импульсов неизбежны. Необходимая полоса пропускания усилителей зависит от длительности усиливаемых импульсов, частоты их повторения и допустимых искажений формы. Обычно область частот для систем ЧПУ заключается в интервале от нуля до нескольких тысяч герц.

Иногда причинами отказов элементов системы ЧПУ, установленных по результатам эксплуатации, являются недоработки при конструировании — разработке принципиальных схем. В качестве такого примера рассмотрим применение в фазовой системе ЧПУ усилителя-ограничителя, схема, входные и выходные характеристики которого приведены на рис. 21.

Хорошие ключевые свойства транзистора позволяют создавать на нем эффектное ограничение. Нагрузочное

сопротивление $R_к$ и сопротивление $R_б$ выбраны так, чтобы при заданном входном сигнале выходной сигнал имел прямоугольную форму. Если рабочая точка находится посередине линейного участка характеристики (рис. 21, *б*), то происходит симметричное двустороннее ограничение. Недостатком такого ограничителя является запаздывание заднего фронта выходного импульса вследствие значительного времени рассасывания носителей после режима насыщения и изменение фронтов выходного сигнала в зависимости от амплитуды входного сигнала, что особенно важно, если после усилителя-ограничителя стоит импульсный элемент, например статический триггер, который применяется в фазовой системе ЧПУ в качестве фазового дискриминатора.

На рис. 22 приведена электрическая схема балансного усилителя постоянного тока, управляющего электромеханическим преобразователем (ЭМП), связанным с золотником гидросистемы станка. Недостатком такой схемы является то, что на нагрузке падает малая часть напряжения, составляющего от 0,3 до 0,6 В; остальная часть напряжения падает на переходе коллектор—эмиттер и со-

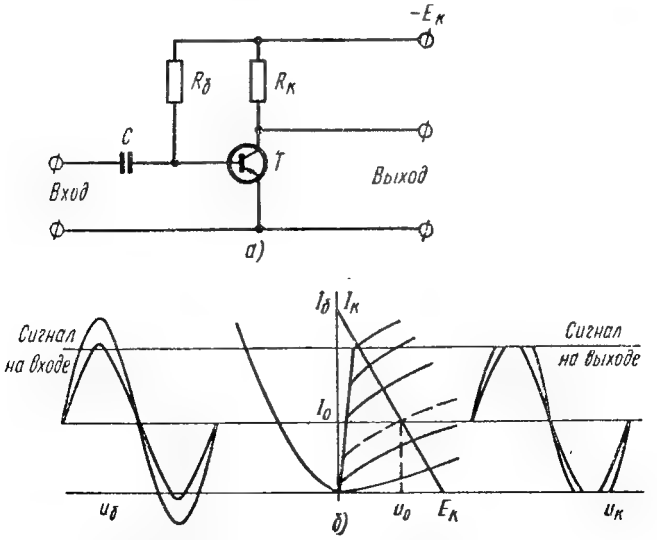


Рис. 21. Транзисторный усилитель-ограничитель:

а — принципиальная схема; *б* — входная и выходная характеристики усилителя-ограничителя; $I_б$ — ток базы; $I_к$ — ток коллектора; $E_к$ — напряжение источника питания; I_0 — ток покоя; u_0 — напряжение смещения

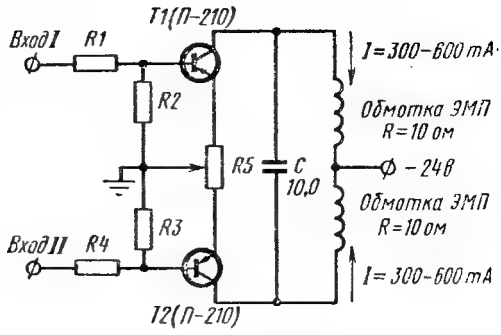


Рис. 22. Принципиальная схема балансного усилителя постоянного тока:

T1, T2 — транзисторы; *R1, R4* (1 кОм), *R2, R3* (750 Ом) — резисторы; *C* (10 мкФ) — конденсатор

противлении 10 Ом. Изменение напряжения на нагрузке в этих пределах происходит за счет системы управления усилителем от фазового дискриминатора (триггера управления), ограничивающего средние значения этой величины. Очевидно, что при протекании максимального значения тока, а оно составляет 600 мА, почти вся мощность будет рассеиваться на переходе коллектор—эмиттер. Тогда, при повышении температуры окружающей среды за допустимые пределы в незначительном размере, в переходе могут произойти тепловой и электрический пробои и транзистор выйдет из строя.

Усилитель, приведенный на рис. 20, обладает тем недостатком, что при изменении величины входного сигнала, считываемого с магнитной ленты (при постоянном усилении), сигнал на выходе усилителя колеблется пропорционально изменению входного сигнала.

В данном разделе рассмотрена только часть вопросов, касающихся усилителей, применяемых в системах ЧПУ; более подробно с этими вопросами можно ознакомиться в литературе [15, 22, 34, 35, 41, 47].

§ 5. КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

Динамические и статические характеристики следящего привода систем ЧПУ в значительной степени определяются параметрами и настройкой корректирующих устройств. Поэтому настройка, стабильность настроечных параметров, их чувствительность и надежность имеют важнейшее значение при эксплуатации следящего привода станков с ЧПУ. В качестве корректирующих устройств в станках с ЧПУ применены жесткие и гибкие обратные связи,

причем эти устройства могут быть электрическими (обратные связи по току и напряжению), гидравлическими (жесткие обратные связи по расходу и давлению), электромеханическими (тахогенераторы постоянного тока), механическими (например, жесткая механическая связь гидроцилиндра с гидронасосом, жесткая обратная связь гидроусилителя с управляющим золотником) и др.

В контурных фазовых системах ЧПУ в качестве корректирующего звена введена обратная связь по скорости, где корректирующий сигнал пропорционален скорости вращения вала гидродвигателя. Этот сигнал получают от тахогенератора постоянного тока, присоединенного через редуктор к валу двигателя. Точность и линейность характеристик тахогенератора постоянного тока зависят от величины нагрузки, температуры, гистерезиса, наличия коллектора со щетками и материалов, из которых он изготовлен. Искажения линейности выходной э. д. с. тахогенератора возникают из-за наличия реакции якоря, наличия переходного напряжения на щетках и коллекторе. Величина «зоны нечувствительности» выходной характеристики определяется

$$\Delta v_{щ} = \frac{u_{щ}}{1 + \frac{R_{Ф}}{R_{н}}},$$

где $u_{щ}$ — переходное напряжение на щетках и коллекторе;

$R_{Ф}$ — сопротивление обмотки якоря;

$R_{н}$ — сопротивление нагрузки.

Как показывает практика, нелинейность тахогенератора при применении его в обратной связи по скорости в следующем приводе приводит к нежелательным автоколебаниям в силовом приводе станков с ЧПУ. К недостаткам тахогенератора можно отнести и сравнительно высокий момент трения (60—100 гсм), возникающий за счет давления щеток на коллектор, а также обычные для коллекторных машин высокочастотные помехи, появляющиеся при работе тахогенератора. К погрешностям тахогенераторов надо отнести и возникновение пульсирующего напряжения из-за того, что генерируемое напряжение в роторе выпрямляется посредством коллектора. Существенную погрешность вносит и температура, изменяющая сопротивление обмотки возбуждения, что приводит к изменению выходной э. д. с. Так, при повыше-

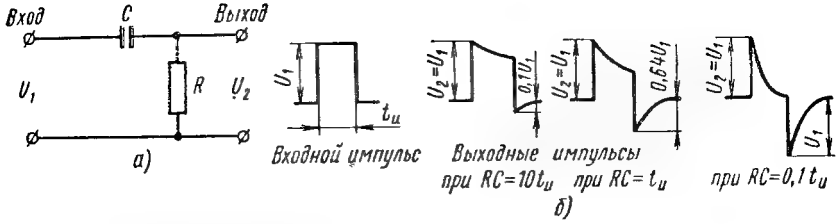


Рис. 23. Дифференцирующая цепь:

а — принципиальная схема; *б* — форма сигналов

нии темпертуры на 20° С сопротивление обмотки увеличивается на 10%.

Электрические корректирующие цепи используются в системах ЧПУ для трех главных целей: фильтрации сигналов, смещения фаз напряжений и стабилизации (выравнивания).

Фильтрующие контуры (фильтры) используются для ослабления нежелательных напряжений.

Фазосмещающие контуры применяются для изменения фазового соотношения между напряжениями сигналов и питания, подаваемого на регулирующие элементы.

Стабилизирующие контуры используются для воздействия на напряжение сигнала рассогласования или на другие сигналы в системах ЧПУ, чтобы способствовать устойчивости и улучшению поведения системы путем изменения ее передаточной функции. Некоторые схемы корректирующих электрических устройств, применяемых в системах ЧПУ, приведены на рис. 23 и 24.

На рис. 23, *а* изображена дифференцирующая цепь, сигнал на выходе которой u_2 пропорционален производной входного сигнала u_1. Так как цепь состоит из сопро-

Рис. 24. Интегрирующая цепь:

а — принципиальная схема; *С* — конденсатор; *R* — сопротивление; u_1, u_2 — сигналы на входе и выходе; *б* — форма сигналов

тивления и емкости, то, для того чтобы эту цепь включить в схему, необходимо согласовать сопротивление дифференцирующей цепи с входным и выходным сопротивлениями схемы относительно точек присоединения.

Дифференцирующая цепь является пассивным четырехполюсником, так как его коэффициент усиления не может быть больше единицы. Фактически происходит даже ослабление сигнала. Вносимое ослабление можно компенсировать соответствующим увеличением коэффициента усиления усилителя системы. Для повышения точности дифференцирования необходимо уменьшать постоянную времени $t = RC$, однако это приводит к уменьшению выходного напряжения. Такая схема применяется там, где точность дифференцирования несущественна, например для заострения импульсов на входе триггера.

При $RC \ll t_и$ за время действия импульса конденсатор успевает практически полностью зарядиться и к моменту окончания прямоугольного импульса напряжение на выходе спадает по экспоненциальному закону. После окончания импульса конденсатор C разряжается на сопротивление R, вследствие чего образуется отрицательный экспоненциальный импульс. В результате прохождения прямоугольного импульса по дифференцирующей цепи на выходе образуются два экспоненциальных разнополярных импульса.

На рис. 23, *б* показано прохождение прямоугольного импульса через дифференцирующую цепь и показана зависимость выходного сигнала от соотношения RC и входного импульса $t_и$.

На рис. 24, *а* показана интегрирующая цепь, используемая при интегрировании электрических сигналов для получения линейно изменяющихся напряжений и токов в системах коррекции. При подаче на вход интегрирующей цепи прямоугольного импульса u_1 (см. рис. 24, *б*) напряжение на выходе представляет две экспоненты: нарастающую и спадающую, которые тем меньше отличаются от отрезков прямых (точного интеграла), чем больше неравенство $RC \gg t_и$.

Основными погрешностями электрических корректирующих цепей являются неустранимые ошибки при дифференцировании и интегрировании, вносимые самими схемами; разброс выходных параметров схемы при колебаниях напряжения питания; зависимость результатов от нагрузки, колебаний температуры, влажности; старение

элементов и разброс их параметров; низкие коэффициенты передачи (меньшие единицы); значительная зависимость выходных параметров от применяемого диапазона частот.

Погрешности, которые появляются в гидравлических и механических корректирующих устройствах, обусловлены появлением люфтов, излишним трением, утечками жидкостей, загрязнениями гидравлических систем, температурой и др.

§ 6. УПРАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Следящие гидросистемы широко применяют в металлорежущих станках с ЧПУ. Применение этих систем позволяет получить ряд преимуществ. Прежде всего они обладают большей мощностью на единицу объема и могут развивать в несколько раз большие моменты, чем электрические устройства тех же размеров и веса. Гидросистемы имеют к. п. д., близкий к к. п. д. силовых электрических двигателей. Малая сжимаемость рабочей жидкости обеспечивает плавное и надежное действие исполнительных устройств и двигателей. Смазывающие свойства рабочего масла устраняют необходимость предусматривать дополнительные смазывающие средства. Одновременно высокая вязкость масла выгодна для подавления вредных высокочастотных сигналов помехи. К недостаткам гидросистем следует отнести бóльшие неудобства работы с маслопроводом, чем с электрическими проводами. Утечка масла из двигателей, трубопроводов и управляющих элементов ухудшает динамические свойства системы. Изменение вязкости с температурой может внести нежелательные изменения в работу системы регулирования, а инерция масла может привести к сильному возрастанию пикового давления, вызывающего гидравлический удар в системе. Опыт показал, что при достаточно большой массе нагрузки значительное влияние на характеристики системы оказывает сжимаемость рабочей жидкости и упругость трубопроводов.

Рассмотрим гидропривод, показанный на рис. 25. Он состоит из насоса переменной производительности *2* с приводом от электродвигателя постоянной скорости *1*, сравнительно короткой гидравлической магистрали, гидродвигателя постоянного расхода *3* и рабочего органа *4*. При подаче сигнала от усилителя *8* в катушку *7* золотник *6*, сместившись, соединит линию нагнетания *P* с левой ча-

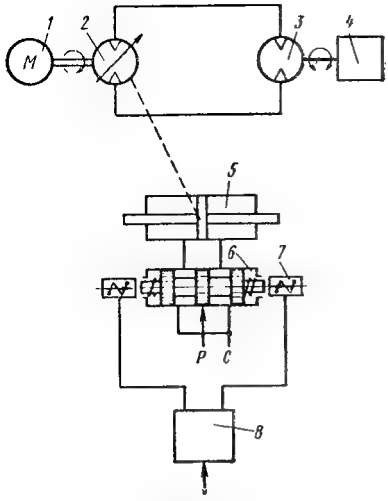


Рис. 25. Функциональная схема гидравлического привода

стью сервоцилиндра *5*, правая часть будет соединена со сливом *С*. Сервоцилиндр механически связан с регулирующим органом насоса переменной производительности *2*. Под действием рабочей жидкости сервоцилиндр повернет регулирующий орган насоса, выведя его из нейтрального положения или изменив производительность и подав рабочую жидкость в гидродвигатель *3*. Двигатель, вращаясь, переместит рабочий орган *4*. В данной схеме образованы две регулирующие системы: золотник *6* и сервоцилиндр *5*, насос с переменной производительностью *2* и гидродвигатель *3*. Золотник в первой системе является управляющим звеном, а сервоцилиндр — усилительным.

В качестве управляющих звеньев в станках с ЧПУ применяют электромеханические преобразователи (ЭМП), шаговые двигатели (ШД), управляющие золотники, сервоцилиндры. Рассмотрим их работу и возникающие в них погрешности и неисправности.

При работе электромеханических преобразователей, управляющих перемещением золотников, должны быть обеспечены необходимые перемещения подвижного элемента, быстродействие, чувствительность, линейность характеристики, минимальные гистерезис и потребляемая мощность и необходимая величина осцилляции, препятствующая затиранию золотников.

Электромеханические преобразователи представляют собой электромагнитные устройства с подвижным якорем. Применяемый ЭМП на станках с фазовой системой ЧПУ изображен на рис. 26. Управление преобразователем осуществляется электрическим током при помощи магнитного поля. Обычно в преобразователях с поступательным движением якоря из-за небольшой асимметрии, вызванной неточной сборкой механической системы, могут воз-

никнуть поперечные силы, создающие серьезные осложнения при жестком соединении управляющего элемента—золотника с якорем преобразователя. Так как якорь преобразователя покоится на мембранах, то в зависимости от степени натяжения и жесткости этих мембран возникают большие силы, изменяющие характеристику, а следовательно, и быстродействие и линейность ЭМП. На быстродействие преобразователя оказывают влияние не только механические параметры и действующие силы, но также и электрические параметры, так как электрическая постоянная времени обмотки является основным фактором, определяющим скорость, с которой может быть создано нужное тяговое усилие. Поэтому изменение количества витков и диаметра провода катушек ЭМП при ремонте нежелательно. Явление гистерезиса, появление которого возможно в ЭМП, имеет электромагнитное и механическое происхождение.

К характерным неисправностям преобразователя необходимо отнести поломку мембран (пружин), электрический пробой обмоток катушек, попадание металлической стружки или пыли в воздушные зазоры подвижного якоря, неправильную центровку якоря преобразователя.

Другим звеном управляющих элементов в гидросистемах станков с ЧПУ является золотниковая пара (золотник) — регулируемый гидравлический дроссель, широко применяемый в гидропередачах в качестве устройства

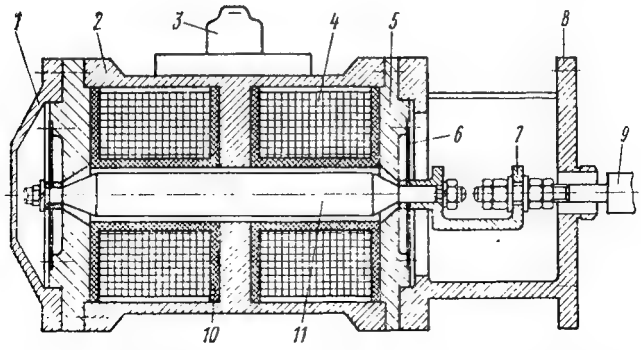


Рис. 26. Конструкция электромеханического преобразователя:

1 — крышка; *2* — корпус; *3* — электрический разъем; *4* — обмотка; *5* — крышка; *6* — мембрана (пружина); *7* — соединительная скоба; *8* — переходной фланец; *9* — золотник; *10* — каркас катушки; *11* — сердечник

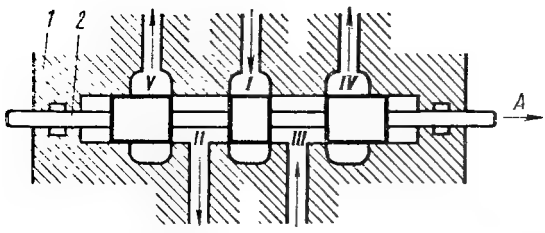


Рис. 27. Золотник поршневого типа

управляющего гидроцилиндрами, гидронасосами, гидродвигателями. Золотник применяется для управления потоком жидкости высокого давления, идущим от источника питания (насосной станции) к исполнительному устройству или гидродвигателю.

Золотниковая пара конструктивно проста, надежна, требует сравнительно небольших усилий для перемещения золотника относительно втулки. В зависимости от числа рабочих окон золотниковые пары бывают одно-, двух- и четырехщелевые. На рис. 27 показан простой золотник поршневого типа. Работа такого золотника происходит следующим образом. Жидкость под постоянным давлением подается в полость *I*. При смещении плунжера *2* относительно корпуса *1* в направлении *А* жидкость из полости *I* попадает в полость *II* и далее, например, гидродвигатель, пройдя через который и заставив его вращаться, попадает в полость *III*, а затем в полость *IV* и далее на слив. При смещении золотника в противоположную сторону жидкость попадает из полости *I*, в полость *III*, далее на двигатель и из него в полости *II* и *V* и на слив.

Для работы золотника в замкнутой гидросистеме станка с ЧПУ необходимо, чтобы его коэффициент усиления был постоянен. Первым фактором, влияющим на коэффициент усиления золотника, является его перемещение. При малых перемещениях и увеличенной вязкости масла реальный расход жидкости становится меньше. Очевидно, следует отдавать предпочтение большим перемещениям золотника, но при больших перемещениях золотника величина утечек через радиальный зазор между золотником и втулкой увеличивается. Увеличение радиального зазора в 2 раза за счет износа дает увеличение утечек жидкости в 8 раз.

Одним из наиболее серьезных аргументов в пользу ограничения перемещения золотника является величина мощности, требующейся для перемещения золотника.

Выходная мощность электромагнитного привода никогда не бывает избыточной, и даже сравнительно небольшое увеличение хода золотника требует увеличения мощности привода, а это приводит иногда к значительному уменьшению быстродействия.

Применение кольцевых проточек во втулках золотников в значительной степени позволяет им самоочищаться от частичек загрязнения, которые прилипают к буртику золотника в зоне щели. Однако другие частички, находящиеся в пространстве между буртиками золотника и закрытой частью втулки, создают значительное трение между золотником и втулкой и в конце концов могут вывести золотник из строя.

Одной из наиболее общих трудностей, с которыми приходится встречаться, является трение и заедание золотников. Вследствие малой жесткости соединения золотника и привода система золотник—привод считается неустойчивой, что может привести к автоколебаниям этой системы.

Во многих золотниках промышленного производства применяют отверстия с конической резьбой для монтажа арматуры. Такой метод соединения не всегда является качественным, так как часто вызывает деформацию корпуса золотника при ввинчивании соединительной арматуры, потому что каждый монтажник стремится ввернуть эти соединения в корпус как можно плотнее. Если рабочий зазор между золотником и втулкой составляет 2,5 мкм, корпус золотника не должен испытывать сильной деформации, которая может привести к искривлению втулки и затиранию или заклиниванию золотника.

Обычно в высококачественных системах используется отрицательная обратная связь; хорошие динамические свойства таких систем обеспечиваются за счет большого коэффициента усиления по замкнутому контуру. Достаточно большие коэффициенты усиления можно применять без нарушения устойчивости системы только в том случае, если все элементы системы обладают характеристикой, близкой к линейной. Поскольку в данном случае рассматривается золотник, то требование линейности относится к зависимости между расходом и перемещением золотника, т. е. при данном перепаде давлений на рабочей щели равные приращения перемещения золотника должны вызывать равные приращения расхода. Даже при точно выполненных прямоугольных окнах крутизна расходной

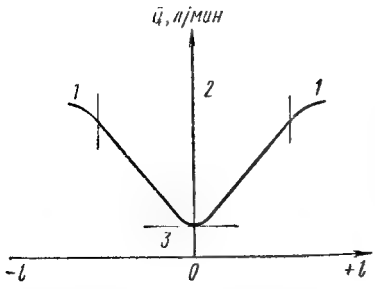


Рис. 28. Расходная характеристика золотника:

Q — расход рабочей жидкости в л/мин; *l* — линейное перемещение золотника; *1*—зона насыщения золотника; *2*—рабочая зона золотника; *3* — утечки, связанные с радиальным зазором и закруглениями кромок рабочих щелей золотника

характеристики золотника (рис. 28) при отсутствии полной отсечки заметно уменьшается вблизи начала координат. Это уменьшение крутизны объясняется чрезмерным предварительным открытием или перекрытием, а также закруглением или притуплением кромок рабочих щелей, вызываемых в результате эрозии острых кромок втулки и золотника.

Это явление почти не зависит от размеров золотника.

Неустойчивость гидросистем может возникать по двум причинам: либо из-за неустойчивости всей системы, либо из-за неустойчивости части системы, обычно управляющего золотника. Неустойчивость, вызываемая пульсацией давления в насосе и подобными периодическими возмущениями, связана с резонансными колебаниями золотника. Явление неустойчивости потока является общим, поскольку почти все виды потоков, за исключением случаев течения очень вязких жидкостей, по крайней мере частично неустойчивы. Когда жидкость обтекает препятствие или даже течет по гладкому каналу со скоростью, превышающей определенную минимальную величину, ее течение неустойчиво; эта неустойчивость проявляется в образовании завихрений рабочей жидкости.

Неустойчивость золотников не обязательно имеет колебательный характер, во многих случаях золотник может быть прижат к одному из упоров силами, которые существуют и при постоянном расходе. В золотниках с неустойчивостью такого типа перепад давлений, действующих на некоторую площадь торца золотника, вызывает силу, перемещающую золотник в сторону открытия или закрытия рабочей щели.

Гидроусилителями называют усилительно-преобразовательные устройства, которые позволяют управлять большими мощностями. Они предназначены для управления

гидронасосами, гидродвигателями, регулируемыми дросселями и клапанами. Различают одно,- двух- и трехкаскадные гидроусилители.

В гидросистемах объемного регулирования станков с ЧПУ наибольшее распространение получили гидроусилители золотникового типа — золотник (I каскад) и сервоцилиндр (II каскад) и электрогидравлические усилители — электромеханический преобразователь (I каскад), золотник (II каскад).

Гидроусилителям присущи недостатки, общие для систем на гидравлических элементах (высокая точность изготовления отдельных деталей с целью уменьшения утечек и улучшения динамических характеристик, например для увеличения рабочего давления; зависимость вязкости рабочей жидкости от температуры, относительная сложность эксплуатационной наладки и др.).

Из существующего большого количества гидроусилителей, применяемых в различных типах станков, в рассматриваемых станках с ЧПУ пока применены только два, один из которых приведен на рис. 29. Характерной особенностью этого двухкаскадного усилителя является то, что в установившемся режиме на электромеханический преобразователь не действует гидродинамическая реакция струи основного потока гидромотора (см. рис. 31). Методы анализа, принцип действия и расчет рассмотрены в работах [9, 10].

Гидроусилитель такого типа с обратными связями является маломощной гидравлической следящей системой дроссельного регулирования с входным сигналом в виде перемещения, получаемого от электромеханического

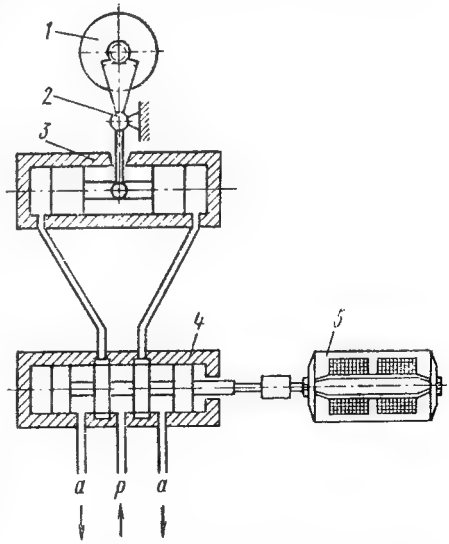


Рис. 29. Схема электрогидроусилителя:

1 — датчик обратной связи; *2* — вал исполнительного органа; *3* — сервоцилиндр; *4* — управляющий золотник; *5* — электромеханический преобразователь; *a* — слив; *p* — давление жидкости

преобразователя. А это приводит к усложнению структуры системы управления станка с ЧПУ. Если учесть, что собственная частота электромеханического преобразователя, примененного в станках с фазовой системой ЧПУ, лежит выше 100 Гц и при этом возникают трудности обеспечения устойчивости системы, то, очевидно, применение гидроусилителя с меньшей частотой снижает качественные характеристики системы. Такой системе управления гидроприводом присущи все недостатки, которые были рассмотрены для золотника. Кроме этих недостатков, гидроусилителям такого типа еще присуще и явление гистеризиса, а при появлении люфтов в системе усилителя появляются и фазовые ошибки, так как эти элементы охвачены электрической обратной связью.

Другой разновидностью гидроусилителей, применяемых в станках с ЧПУ, является аксиально-плунжерный гидродвигатель, работающий с золотником вращения. Гидродвигатель с золотником образуют автономную следящую систему с жесткой отрицательной обратной связью по углу поворота выходного вала. Эта система при вращении золотника шаговым двигателем может рассматриваться как усилитель моментов (рис. 30).

Масло от лопастного насоса, вращаемого асинхронным двигателем, подается через фильтр и обратный клапан по трубе *9* к гидроусилителю моментов, состоящему из управляющего золотника и гидродвигателя. Входной вал

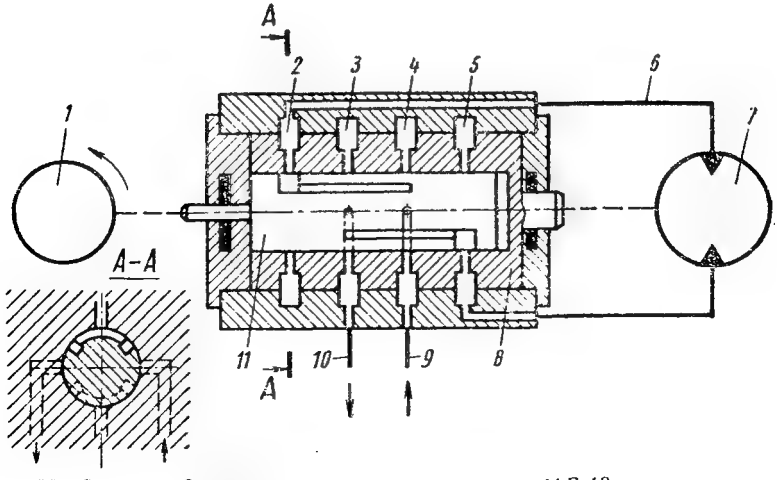


Рис. 30. Схема гидроусилителя моментов типа МГ-18

управляющего золотника *11* связан с шаговым двигателем *1* и вращается во втулке *8*. Во втулке имеются два отверстия, выходящие в проточку *4*, соединенную с линией нагнетания насоса трубой *9*, и два отверстия, выходящие в проточку *3*, соединенную с линией слива трубой *10*. Отверстия во втулке *8*, выходящие в проточки *2* и *5* через трубы *6*, соединены с рабочими полостями гидродвигателя *7*. В золотнике имеются четыре фрезерованные канавки и четыре уплотняющих пояска. Когда золотник *11* находится в среднем положении, его уплотняющие пояски перекрывают отверстия, выходящие в канавки *3* и *4*, и обе полости гидродвигателя заперты. Рабочий орган станка не двигается. При повороте золотника *11* от среднего положения в ту или другую сторону шаговым двигателем *1* одна из полостей гидродвигателя соединяется с линией нагнетания, а вторая — со сливом в бак. Гидродвигатель приходит в движение. Втулка *8* жестко связана с валом гидродвигателя. Вал гидродвигателя вместе с втулкой *8* поворачивается до тех пор, пока отвертия, входящие в проточки *3* и *4* втулки *8*, не будут перекрыты поясками золотника *11* (жесткая обратная связь уменьшает рассогласование в системе). Угол поворота золотника *11* соответствует углу поворота шагового двигателя; следовательно, гидродвигатель точно отрабатывает углы поворота шагового двигателя *1*.

Крутящий момент двигателя пропорционален перепаду давления в гидросистеме между обеими его полостями.

Гидроусилители имеют ряд преимуществ по сравнению с усилителями другого типа: меньшую инерционность и лучшие динамические характеристики, малые веса и габариты, кроме того, удобны для преобразования энергии потока жидкости в механическую энергию и позволяют управлять большими мощностями. Но им присущи и недостатки: высокая точность изготовления отдельных деталей и, как следствие, быстрый износ при эксплуатации, утечки масла и ухудшение из-за этого динамических характеристик, зависимость вязкости рабочей жидкости от температуры, относительная сложность эксплуатационной наладки.

Для гидроусилителей типа МГ-18 характерным недостатком является то, что при увеличении проходного сечения золотника момент на выходном валу гидродвигателя растет, а жесткость системы золотник—гидродвигатель падает.

Основные факторы, влияющие на устойчивость и точность гидроусилителей, кроме точности изготовления механических элементов системы, а именно сжимаемость и утечки жидкости, деформация трубопроводов, трение и люфты в соединениях, рассмотрены в работах [2, 9, 10, 19, 21, 31].

§ 7. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА РАБОТУ ГИДРОСИСТЕМЫ СТАНКА С ЧПУ

Использование в станках с ЧПУ гидросистем управления имеет пока ряд преимуществ по сравнению с электрическими системами приводов подач. В частности, они отличаются бóльшим диапазоном плавного изменения скоростей гидродвигателей, удобством преобразования энергии потока жидкости в механическую энергию поступательного и вращательного движений без промежуточных кинематических механизмов (редукторов), сочетанием большой выходной мощности, малыми габаритами, высокими динамическими качествами и т. д. Однако они обладают и рядом существенных недостатков. Большим недостатком гидроагрегатов системы являются утечки рабочей жидкости и то, что они сами могут быть источником загрязнений жидкости из-за наличия трущихся частей и продуктов износа. При правильном конструировании и качественном изготовлении элементов и узлов гидроагрегатов и надлежащем обслуживании эти утечки и загрязнения могут быть сведены до минимума, но сделать гидросистему абсолютно чистой и лишенной утечек невозможно. Вторым большим недостатком гидросистем является то, что свойства рабочей жидкости и ее физические параметры быстро меняются от загрязнений и внешних факторов. Как и в первом случае, устранить этот недостаток можно только качественным подбором рабочей жидкости и особенно путем надлежащей эксплуатации.

Настоящий раздел дает элементарные сведения о свойствах рабочих масел и проблемах, встречающихся при эксплуатации гидросистем станков с ЧПУ.

Жидкости считаются несжимаемыми, в действительности же все гидросистемы засасывают хотя бы незначительное количество воздуха, который смешивается с жидкостью. В результате длительной работы системы все масло оказывается насыщенным воздухом и содержит значительный объем воздуха в виде мельчайших пузырь-

ков. Это явление еще более усугубляется, если жидкость склонна к вспениванию. Растворенный воздух в большинстве случаев мало влияет на сжимаемость жидкости при больших давлениях, но пузырьки воздуха могут сделать систему неработоспособной. При низких давлениях даже маленькие пузырьки воздуха сильно увеличивают сжимаемость масла. Для тяжелых станков с ЧПУ, где массы, приводимые в движение гидродвигателями, велики и режимы резания большие, это может сказаться на работоспособности станка, быстродействии привода, точности обработки детали.

Многие жидкости, даже будучи помещены в сосуды, поверхности которых идеально инертны по отношению к ним, при нагреве до сравнительно умеренной температуры изменяют свой химический состав. Это изменение сопровождается выделением летучих фракций или полимеризацией, когда образуются смолы, осадки и коксоподобные вещества, либо имеют место оба процесса одновременно. По мере повышения температуры масло теряет свои свойства рабочей жидкости и становится непригодным для использования в гидросистемах. В реальных системах станков с ЧПУ этот процесс может быть значительно ускорен за счет того, что жидкости соприкасаются с металлами и другими веществами, действующими как катализаторы.

Большинство рабочих жидкостей для гидросистем представляет собой смеси органических веществ, а продукты разложения вместе с примесями и водой образуют взвеси, частично выпадающие в виде осадка в различных частях гидросистемы. Большая часть осадка остается на фильтрах, которые часто приходится менять, чтобы избежать полного засорения. При нормальной рабочей температуре образование осадка происходит довольно медленно, и выход гидросистемы из строя случается только в том случае, если не соблюдаются правила эксплуатации.

Во всех гидросистемах в жидкости более или менее быстро накапливается конденсат. Большая часть воды остается на дне масляного резервуара, по крайней мере в системах, где используются масла на нефтяной основе, а некоторое количество циркулирует вместе с маслом в виде эмульсии или становится одной из составных частей осадка. Присутствие воды в гидросистеме значительно увеличивает коррозионное действие продуктов окисления масла, обладающих кислотными свойствами,

на элементы системы. Это корродирующее действие можно уменьшить при правильной эксплуатации систем. Фильтры следует менять до того, как появится возможность полного засорения; необходимо удалять из масляного резервуара конденсат и осадок и в особых случаях полностью сливать масло из гидросистемы и промывать ее. При смене жидкости необходимо обращать внимание на очистку всей системы от остатков старой жидкости перед тем, как будет залита новая, так как некоторые жидкости не допускают взаимного смешивания.

В гидросистемах масло постоянно циркулирует и используется многократно. Часто масло при взбалтывании вспенивается, приобретая склонность к окислению. Так как масла, которые не могут противостоять этой тенденции, густеют и делаются слишком вязкими, необходимо применять химически устойчивые масла. Масло должно иметь достаточную вязкость, чтобы обеспечивать хорошее уплотнение насосов, золотников, поршней гидродвигателей, но не настолько большую, чтобы создавать избыточное сопротивление в потоке, так как повышение вязкости увеличивает нагрузку и вызывает излишний износ деталей. Маловязкая жидкость также ведет к неоправданно быстрому износу движущихся частей. К сожалению, вязкость масла не остается постоянной при изменении температуры. Обычные нефтяные парафиновые масла изменяют свою вязкость в 110 раз при изменении температуры от +38° до —18° С. Применение масла такого типа делает необходимым либо автоматически регулировать температуру масла, либо согласиться с значительными изменениями поведения системы.

Частицы загрязнения могут попадать в гидросистему также с рабочей жидкостью вследствие плохой промывки деталей гидросистемы от полировочных паст и микропорошков при сборке системы после ремонта. Твердость некоторых компонентов загрязнений часто превышает твердость материалов, применяемых при изготовлении трущихся пар гидроагрегатов. Загрязнение уменьшает надежность и срок службы гидроузлов иногда до десятикратного значения.

Механические частицы способствуют разрыву масляной пленки, ухудшая режим смазки, а также могут вызвать закупорку дроссельных щелей и прочих каналов малого сечения. При этом увеличивается трение, появляется возможность заклинивания некоторых подвижных

частей и возникает скачкообразное движение привода при плавном изменении сигнала управления. Практически такое явление наиболее вероятно в золотниковых распределительных устройствах следящих приводов станков с ЧПУ, где величина радиального зазора между плунжером и втулкой золотника колеблется в пределах нескольких микрон (по данным Т. М. Башта средний размер частиц в 1 см³ «чистой» жидкости колеблется в пределах 3—25 мкм).

В гидросистемах станков с ЧПУ рекомендуются масла низкой вязкости — веретенное АУ или «Индустриальное 12 (02)».

Отечественная промышленность выпускает также масло марки ВНИИ МП-1, применение которого значительно повышает надежность гидросистем станков с ЧПУ.

§ 8. ПРИВОДЫ СТАНКОВ С ЧПУ

В качестве исполнительных силовых двигателей и серводвигателей в станках с ЧПУ применяют гидроприводы (гидродвигатели и гидроцилиндры), электродвигатели постоянного тока и шаговые двигатели.

Гидропривод. Силовым элементом гидропривода является гидропередача. Гидропередачей называется устройство, предназначенное для передачи механической энергии посредством жидкости. Существуют две основные схемы питания гидродвигателей в гидропередачах станков с ЧПУ: от гидронасоса с регулируемой производительностью — объемное управление и от дроссельного устройства (золотника) — дроссельное управление.

Гидросистемы имеют довольно высокий к. п. д. — в пределах 85—95% при полном моменте и полной скорости, что выше, чем к. п. д. у электрических машин.

На рис. 31 представлена принципиальная схема объемного гидропривода станка с ЧПУ. Основной насос *11* приводится во вращение от асинхронного электродвигателя *12* с постоянной скоростью. Производительность гидронасоса меняется в зависимости от изменения угла поворота цилиндрового блока насоса. В данной схеме применен аксиально-поршневой насос с максимальной производительностью 47 л/мин и номинальным рабочим давлением 50 кгс/см². Максимальный крутящий момент, разливаемый гидромотором *2*, является постоянным, не зависимым от его числа оборотов, и определяется наст-

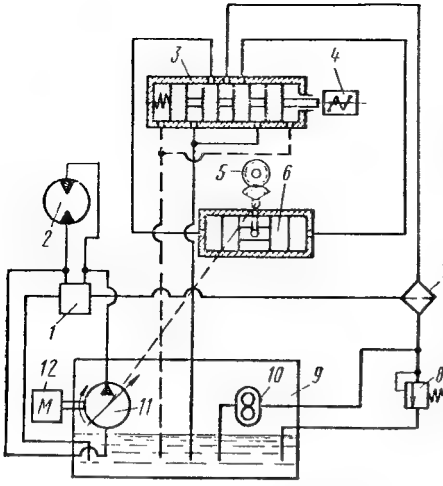


Рис. 31. Гидравлическая схема станка с ЧПУ типа ФП-7 (одна координата)

ройкой клапанов *1*. Шестеренчатый насос *10* приводится во вращение от того же электродвигателя, что и основной насос, и развивает постоянную производительность. Нагнетаемая этим насосом в систему рабочая жидкость подается под давлением 18—20 кгс/см², настраиваемым клапаном *8*, через фильтр *7* к управляющему золотнику *3* и клапанной коробке *1*. К клапанной коробке рабочая жидкость подается для покрытия утечек, которые могут произойти в основном насосе, гидромоторе и соединяющих их трубопроводах. Давление в магистрали после фильтра поддерживается сливным клапаном в клапанной коробке, который обычно настраивается на давление 11—13 кгс/см². Поворот цилиндрового блока основного насоса в ту или в другую сторону на требуемый угол осуществляется при помощи поршня *6* гидроусилителя, к которому рабочая жидкость подается от управляющего золотника *3*. Обе полости цилиндра одинакового сечения. Направление и скорость перемещения поршня *6* зависит от того, в какую полость цилиндра подана рабочая жидкость и в каком объеме.

Электромеханический преобразователь *4* служит для преобразования управляющего сигнала постоянного тока, поступающего с выходного каскада усилителя мощности, в механическое перемещение сердечника ЭМП и жестко связанного с ним управляющего золотника *3*.

При протекании в обеих катушках одинакового по величине тока электромагнитные силы, создаваемые обеими катушками, уравновешены и сердечник находится в среднем положении. При этом в среднем положении остается золотник *3*, в результате чего давления в обеих полостях цилиндра гидроусилителя равны между собой и поршень остается неподвижным. При разности токов, протекаю-

щих в катушках ЭМП, сердечник перемещается в сторону большого тока, пропорционально этой разности. Вместе с сердечником перемещается и золотник, в результате чего щель соединяет нагнетательный канал золотника с одной из полостей цилиндра. При этом увеличивается щель, соединяющая другую полость цилиндра со сливным каналом, сообщающимся с масляным баком *9*, и поршень начинает двигаться, поворачивая при этом цилиндровый блок насоса *11*. Скорость перемещения поршня, а отсюда и скорость поворота цилиндрового блока зависят от величины сигнала, поступившего к электромеханическому преобразователю. По мере поворота цилиндрового блока насоса происходит поворот датчика обратной связи *5*. Поворот цилиндрового блока происходит до тех пор, пока управляющие сигналы, поступающие в сравнивающие устройства электронной схемы станка, и сигналы от датчика обратной связи не уравняются и сердечник вместе с золотником не вернется в среднее положение.

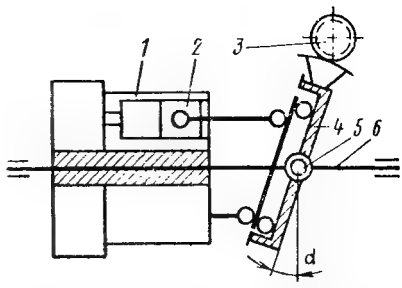


Рис. 32. Схема аксиально-поршневого насоса регулируемой производительности

Аксиально-поршневые насосы с регулируемой производительностью получили распространение в гидропередачах с объемным управлением благодаря высокому к. п. д. и большой равномерности подачи. Принципиальная схема аксиально-поршневого насоса приведена на рис. 32. В этом насосе имеется блок цилиндров *1*, который вращается вместе с валом *6* насоса. В цилиндрах этого блока перемещаются поршни *2*, концы которых упираются в наклонную шайбу *4*. Наклонная шайба вращается вместе с валом от силового карданного шарнира *5*. Наклон шайбы *4* может изменяться на угол α с помощью зубчатого сектора, сцепленного с зубчатым колесом *3*, валик которого является регулирующим устройством. Когда угол $\alpha = 0$, у насоса нулевая производительность. Изменение хода поршней, отсюда и регулирование производительности насоса достигаются изменением угла α наклона шайбы. Максимальное значение этого угла обычно не превышает 30°.

Конструкция гидромотора приведена на рис. 33 (разработана в ЭНИМСе) Гидромотор имеет двойной ротор; в роторе *1* расположены поршни *2*, а в роторе *3* толкатели *5*, упирающиеся в упорный подшипник *6*. Соединенный с приводным валом *7* шпонкой *4* ротор *3* передает вращение ротору *1* при помощи штифта *8*, который нагружается незначительным крутящим моментом, достаточным для преодоления сил трения в торцовом распределителе масла *10*. Ротор *1*, таким образом, полностью разгружается от каких-либо боковых сил, что является преимуществом данной конструкции. Эта конструкция работает по такой принципиальной схеме: сила давления масла, действуя на цилиндрические поршни *2* через толкатели *5*, передается на кольцо упорного подшипника *6*, наклоненное относительно оси ротора *3* (обычно угол наклона составляет 30°). Тангенциальные слагающие силы вращают ротор *3*. Для уменьшения веса поршни выполнены полыми. Оси поршней и толкателей совпадают. Пружинами *9* постоянно выбирается зазор в торцовом распределителе. Справа на рисунке показан гидроусилитель моментов, схема работы которого была описана выше (электрошаговый двигатель не показан).

Утечка в таких двигателях, а следовательно, и объемный к. п. д. определяются главным образом зазорами между распределительной шайбой и камерами нагнетания и слива. Перепад давления между этими камерами определяются нагрузкой двигателя (включая нагрузку от собственного трения двигателя, его момент инерции) и вязкостью рабочей жидкости. Перепад давления у не-

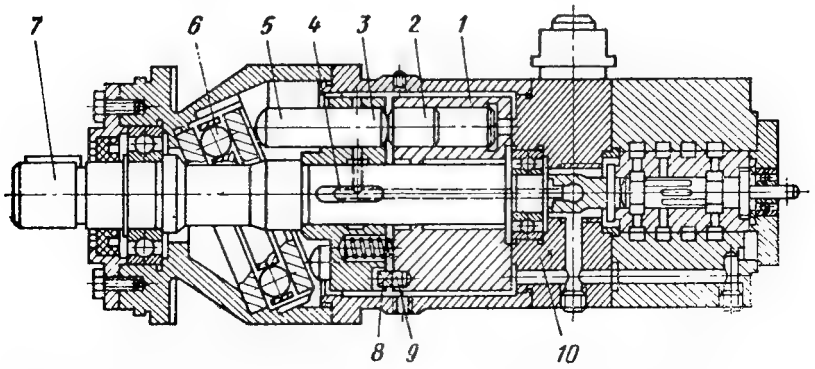


Рис. 33. Конструкция гидромотора с гидроусилителем моментов

нагруженного двигателя значительный вследствие большого трения в передающем механизме (в виде наклонной шайбы) и трения, создаваемого распределительной шайбой. Увеличение трения и утечки в таких гидродвигателях создают и большее демпфирование.

Схема дроссельного управления представлена на рис. 34. Этот привод используется во фрезерном станке с фазовой системой ЧПУ типа ПФП-1.

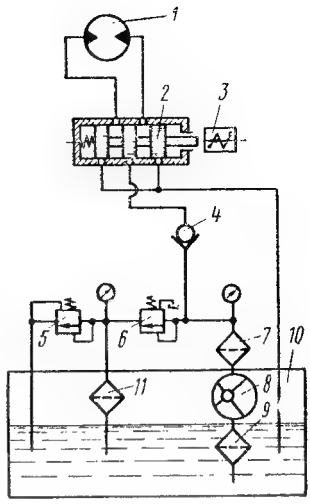


Рис. 34. Принципиальная гидросхема станка с дроссельным управлением

Лопастной насос *8* подает масло по трубопроводу через обратный клапан *4* в среднее окно четырехщелевого золотника *2*, который управляется электромеханическим преобразователем *3*. Клапан *6* — редукционный, поддерживающий постоянное давление на входе, а клапан *5* — напорный.

Гидросистема станка имеет фильтры *7*, *11* и *9* тонкой и грубой очистки. При засорении фильтра *11* клапан *5* является предохранительным клапаном.

При отклонении электромеханического преобразователя под действием управляющего сигнала с электронной схемы управления станком смещается золотник, и поток масла по одному из каналов поступает в гидродвигатель *1*, который приводит в движение рабочий орган станка; второй канал золотника в этом случае сообщается со сливом, и поток отработанной жидкости из гидромотора сливается в бак *10*. При отклонении золотника в другую сторону, т. е. при изменении направления вращения гидродвигателя, система работает аналогично.

Из рассмотренного принципа действия гидросистемы следует, что гидродвигатель работает лишь тогда, когда управляющий золотник выходит из среднего положения. Скорость вращения двигателя зависит от величины перемещения золотника.

До последнего времени в большинстве выпускаемых станков с ЧПУ и следящим гидроприводом использова-

лись приводы дроссельного управления. В настоящее время в приводах подач станков с ЧПУ применяют гидропередачи объемного управления, которые имеют более высокий к. п. д., чем привод дроссельного управления; нагрев рабочей жидкости при использовании привода объемного управления меньше, более плавно обеспечивается реверсирование и торможение гидродвигателя. Такая гидропередача позволяет проще программировать не только скорость выходного вала гидропередачи, но и ускорения.

Для обеспечения нормальной эксплуатации станков с следящей гидросистемой необходимо знать ее недостатки и влияние этих недостатков на работу системы.

На работу гидропередачи влияет упругость механических и гидравлических звеньев системы. При установившихся давлениях в гидросистеме и скоростях рабочего органа станка в кинематической цепи не изменяются деформации, однако при динамических нагрузках, например, при резании, в переходных процессах при скачкообразном изменении скорости движения рабочего органа наблюдаются явления, связанные с податливостью элементов передачи за счет скручивания валов, деформации зубчатых колес, сжимаемости, что является основной причиной появления вибрации рабочей жидкости и снижения точности слежения системы.

При трогании с места рабочих органов станка необходимо до начала движения компенсировать утечки и заполнить (либо пополнить) открывающиеся полости гидропередачи подачей в них количества жидкости, необходимого для компенсации уменьшенного объема жидкости. Для подачи необходимого объема жидкости в гидропередачи требуется время. Это время запаздывания увеличивает нечувствительность системы, уменьшает ее точность слежения и устойчивость и увеличивает рассогласование между возмущающим сигналом и отработкой его рабочим органом станка. При наличии еще упругих механических звеньев в такой передаче это увеличивает еще больше время запаздывания.

Податливость системы увеличивается при наличии в жидкости нерастворенного воздуха особенно при малых давлениях, когда сжимаемость рабочей жидкости увеличивается.

Утечки в системе увеличивают ее демпфирование, но одновременно они замедляют реагирование системы,

уменьшают ее чувствительность и точность, снижают к. п. д. и уменьшают жесткость системы.

Нагрев рабочей жидкости вызывает «дрейф» нулевого положения и вносит искажения в точности слежения.

Повышение давления жидкости в системе за счет неправильной регулировки клапанов увеличивает тяговую силу, скорость вращения гидродвигателей, точность слежения и мощность гидравлической системы, но в то же время увеличение давления уменьшает устойчивость системы, увеличивает утечки, снижает долговечность и надежность насосов и гидродвигателей, увеличивает силы трения и силы реакции струи жидкости в золотниках.

Особенностью гидромоторов при дроссельном регулировании является зависимость момента трогания от углового положения его вала. Как показывают экспериментальные данные, при изменении угла поворота вала гидромотора наблюдаются пики перепада давления, количество которых зависит от числа поршней в гидродвигателе. Перепад давления при трогании меняется в зависимости от угла поворота вала гидродвигателя приблизительно на 20%.

Большое значение имеют характеристики клапанов, устанавливаемых в гидроаппаратуре станка. Стандартные клапаны, применяемые в станкостроении, из-за негерметичности и больших утечек не могут обеспечить в гидросистемах станков с ЧПУ широкий диапазон устойчивых скоростей рабочих подач. При низких скоростях масло, поступающее в гидросистему малыми порциями, в основном идет на покрытие утечек.

Шаговые двигатели. С развитием импульсных систем в станках с ЧПУ широкое применение в качестве исполнительных и управляющих элементов получили шаговые двигатели, которые совместно с полупроводниковым управлением можно рассматривать как систему частотного регулирования синхронного электродвигателя с применением фиксации углового положения неподвижного ротора (частота меняется от нуля). Вопросы теории и расчета систем с шаговыми двигателями подробно освещены в литературе [2, 6, 11].

Разработанные ЭНИМСом шаговые двигатели применяются в качестве серводвигателей совместно с гидроусилителями моментов в станках типа 6Н13-ГЭ2, ГФ-770, ФП-4, 1К62-Ф3 и др., а также в лентопротяжных механизмах станков с фазовой системой управления.

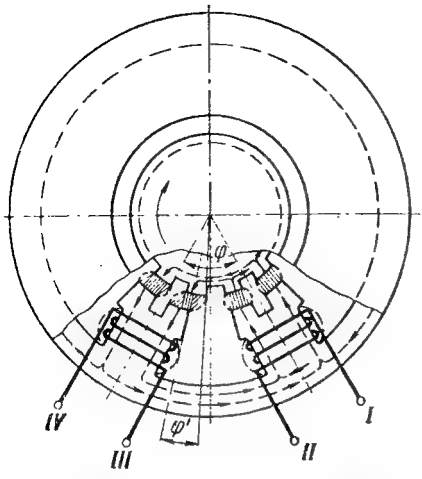


Рис. 35. Взаимодействие полей статора и ротора шагового двигателя

В шаговых двигателях с реактивным ротором в качестве двигающей силы используется тангенциальная составляющая электромагнитной силы, возникающая между зубцами статора и ротора (рис. 35). Она поворачивает ротор в положение максимальной магнитной проводимости. При отключении обмотки I—II и возбуждении обмотки *III—IV* ось магнитного поля повернется в пространстве на угол φ, в то время как ротор повернется на значительно меньший угол φ′. Таким образом, при последовательном переключении обмоток скорость вращения оси поля в несколько раз больше, чем скорость вращения ротора.

Рассмотрим недостатки, свойственные всем разработанным шаговым двигателям.

За счет неточного изготовления зубцов ротора и статора появляется ошибка по углу поворота. В выпускаемых серийно шаговых двигателях ошибка составляет ± 20′ на один шаг (единичный угол поворота).

Отклонения от синхронизма, изменяющиеся с частотой вращения вала, вызываются эксцентриситетом ротора относительно расточки статора и появлением радиальных люфтов в подшипниках или вследствие перекосов, возникающих при неправильной сборке двигателей, а также за счет износа посадочных мест подшипников.

Степень устойчивости шагового двигателя, т. е. его способность работать без потери шагов, что совершенно необходимо в системах станков без обратных связей, определяется поведением двигателя в режиме переключения. Если управляющий импульс переключает обмотки управления в момент, когда ротор в процессе свободных колебаний, находясь около исходной точки устойчивого равновесия, отклонился в сторону, обратную направлению вращения, больше чем на полшага, то ротор оказывается

вне зоны устойчивости. Ротор переместится в направлении ближайшей точки устойчивого равновесия, т. е. назад. Происходит опрокидывание или сбой шагового двигателя. При поступлении следующих тактовых импульсов может наступить режим хаотических движений ротора. Наиболее опасным, с точки зрения сбоя режима шагового двигателя, является состояние ненагруженного двигателя, когда амплитуда свободных колебаний ротора максимальна.

Шаговые двигатели при холостом ходе теряют устойчивость на некоторых частотах, называемых резонансными; это явление наступает при неправильной регулировке демпферов или изменении электрических парамегров управления шагового двигателя.

С устойчивостью тесно связано понятие о частоте приемистости шагового двигателя, под которой понимается максимальный перепад частот следования управляющих импульсов, при которых ротор шагового двигателя втягивается в синхронизм без потери шага (импульса). Приемистость шагового двигателя является одним из основных факторов качества двигателя и зависит от момента инерции вращающихся частей, схемы управления, величины нагрузки и режима работы. Если для шагового двигателя типа ШД-4 приемистость при шеститактной схеме управления при безынерционной нагрузке составляет 800 Гц, то при увеличении нагрузки в процессе эксплуатации двигателя в станках с ЧПУ и трения в золотнике гидроусилителя его приемистость будет падать. На рис. 36 приведена характеристика зоны приемистости в функции момента инерции нагрузки, снятая при шестигактной схеме управления и шестикратной форсировке. До величин момента инерции нагрузки, равных моменту инерции ротора шагового двигателя, приемистость двигателя изменяется незначительно.

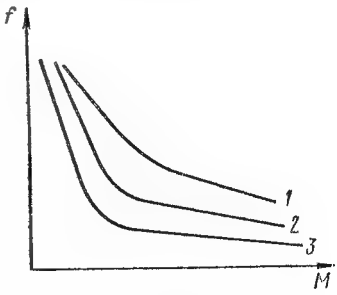


Рис. 36. Зависимость приемистости шагового двигателя f в функции момента инерции ротора M при моменте нагрузки, равном нулю:

1 — режим пуска; *2* — режим реверса; *3* — режим останова двигателя

Свободные колебания ротора в процессе отработки шагов являются крайне нежелательными

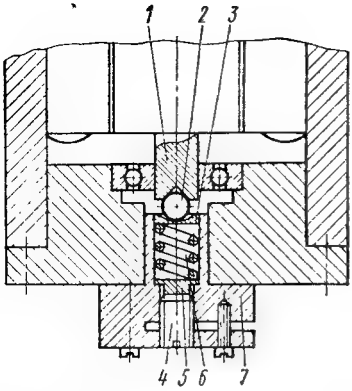


Рис. 37. Система демпфирования шагового двигателя

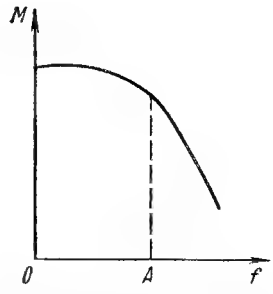


Рис. 38. Механическая характеристика шагового двигателя

и, как уже указывалось, могут привести к сбоям в работе шагового двигателя, поэтому применяют демпфирование. В шаговом двигателе ШД-4 демпфирование осуществлено механической нагрузкой (рис. 37). Вал ротора шагового двигателя *1* нагружен пружиной *6*, расположенной в направляющей втулке *7*, через шарик *2* и опорную шайбу *3*. Сила нагрузки регулируется пружиной и винтом *4*, для предотвращения закручивания пружины со стороны винта установлена фасонная шайба *5*. Недостатком такого типа демпфирования является то, что при вращении вала ротора в одну сторону пружина работает на скручивание, при вращении вала в другую сторону — на раскручивание. Попадание пыли и смазки изменяет условия демпфирования.

С увеличением частоты следования управляющих импульсов среднее значение синхронизирующего момента на валу шагового двигателя падает. Это объясняется тем, что э. д. с. самоиндукции становятся соизмеримыми с напряжением источника питания и ток в обмотках управления за время такта не успевает нарастать до установившегося значения. Механическая характеристика шагового двигателя, дающая зависимость среднего значения синхронизирующего момента на валу двигателя от частоты следования управляющих импульсов, имеет резко выраженный падающий характер; эта характеристика изображена на рис. 38. Точка *A* на характеристике определяет предельное значение частоты управления шаговым двигателем. Для двигателя ШД-4 предельная частота 800 Гц. Новые двигатели модели ШД-5Д имеют приемистость

2000 Гц и могут при плавном разгоне отрабатывать частоту не менее 8000 Гц.

Электродвигатели. Основной особенностью электродвигателей постоянного тока, применяемых в следящих приводах станков с ЧПУ, является весьма широкий и плавный диапазон регулирования скоростей с переменой направления вращения. Выпуск двигателей постоянного тока с малой инерцией и высокими перегрузочными свойствами, наряду с высоким быстродействием тиристорных электроприводов, обеспечивает усиленную конкуренцию с гидроприводом в станках с ЧПУ.

Тиристорные электроприводы серии ПТ на базе двигателей ПБСТ и тиристорных преобразователей с транзисторным управлением обеспечивают высокую стабильность скорости при изменении нагрузки, напряжения сети, температуры окружающей среды и высокое быстродействие при переходных процессах.

Для питания якорных цепей электродвигателей и обмоток возбуждения электрических машин наибольшее распространение нашли тиристорные преобразователи с трехфазным двухполупериодным выпрямлением. Выбор этих схем определен оптимальным соотношением между величинами обратного и прямого напряжения на вентилях и питающим напряжением.

Силовой привод, применяемый на станках с ЧПУ типа 6М13-НГ1, комплектуется серийно выпускаемыми электроприводами серии ПТЗР, оснащенными тиристорными преобразователями и другими устройствами, позволяющими изменять скорость рабочих органов станка в диапазоне от 1000 : 1 до 2000 : 1. В качестве двигателей в ПТЗР применены электродвигатели серии ПБСТ-23 мощностью 0,55 и 0,85 кВт.

Тиристорный электропривод серии ПТЗР представляет собой систему автоматического регулирования, охваченную отрицательной обратной связью по скорости. Структурная схема электропривода приведена на рис. 39, *а*.

Работа электропривода осуществляется следующим образом. Сигнал от системы ЧПУ алгебраически суммируется в корректирующем звене *1* с сигналом обратной связи, приходящим от тахогенератора *6*. Усиленный сигнал постоянного тока с выхода корректирующего звена накладывается на пилообразное напряжение, формируемое блоком пилообразных напряжений *2*. Пилообразное напряжение служит для фиксации моментов формирова-

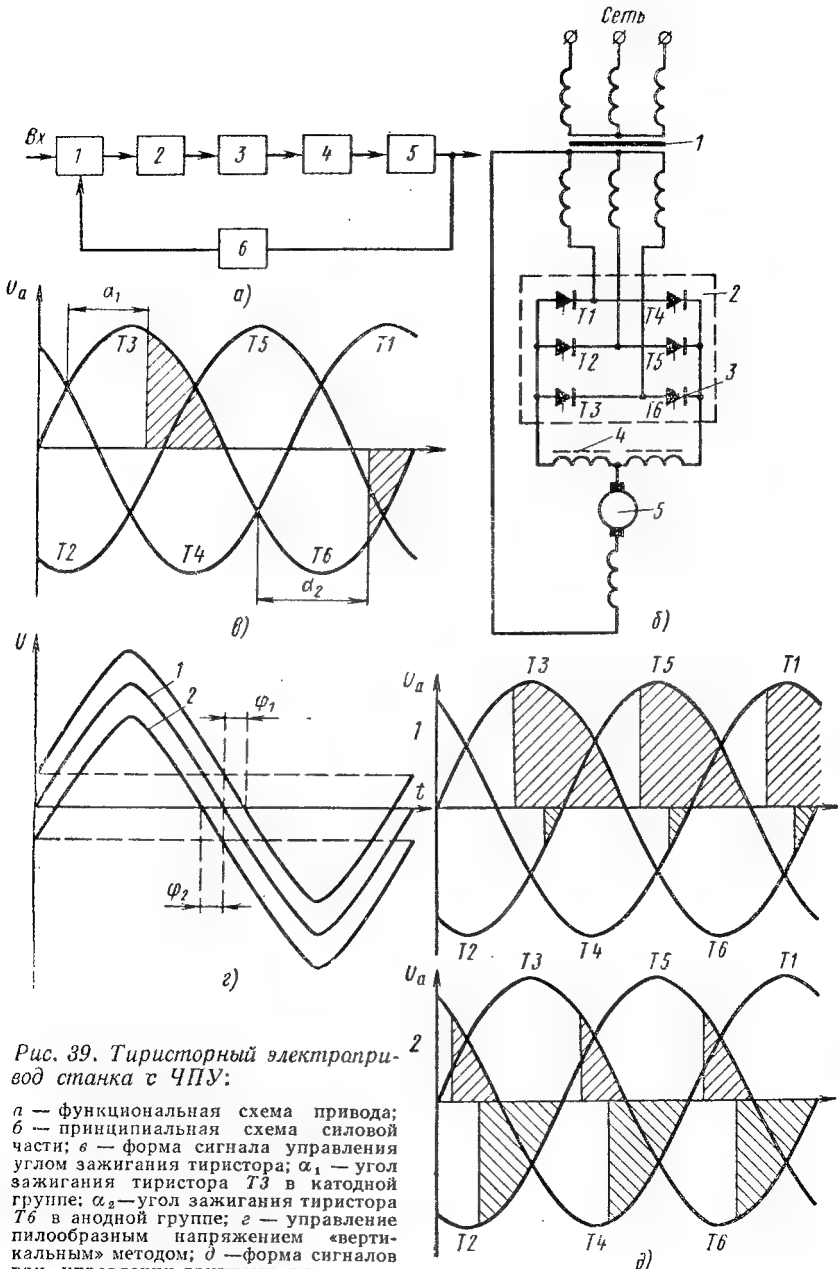


Рис. 39. Тиристорный электропривод станка с ЧПУ:

а — функциональная схема привода; *б* — принципиальная схема силовой части; *в* — форма сигнала управления углом зажигания тиристора; α_1 — угол зажигания тиристора *Т3* в катодной группе; α_2 — угол зажигания тиристора *Т6* в анодной группе; *г* — управление пилообразным напряжением «вертикальным» методом; *д* — форма сигналов при управлении группами тиристоров

ния управляющих импульсов тиристорного выпрямителя. Сигналы с блока пилообразных напряжений подаются на вход блока управления *3*. Блок управления включает три идентичные системы управления углом отпирания тиристоров одной группы (выпрямительной или инверторной).

Знак и величина сигнала определяются изменением фазы выходных импульсов блока управления *3*. Фаза управляющих импульсов определяет величину угла проводимости тиристоров в тиристорном преобразователе *4* и напряжение на якоре двигателя *5*, т. е. его скорость и направление вращения.

Тиристорный электропривод является управляющим источником питания двигателя постоянного тока, т. е. усилителем мощности с весьма высоким коэффициентом усиления по мощности, достигающим значения 4000.

Силовая часть тиристорного преобразователя (рис. 39, *б*) представляет собой трехфазную мостовую выпрямительную схему с нулевым проводом, которая питается от трансформатора *1*, соединенного по схеме звезда—звезда.

Выпрямительный блок *2* собран из кремниевых управляемых выпрямителей-тиристоров *3*. Применяемые для этого тиристоры типа ТЛ-50 или ТЛ-100 имеют лавинную характеристику, которая позволяет восстанавливаться структуре *pn*—*np*-переходов тиристора в случае кратковременного превышения допустимого напряжения.

Анодная и катодная группы тиристоров преобразователя соединены между собой через два последовательных реактора (дросселя) *4*, предназначенных для ограничения и выравнивания уравнительного тока в контуре преобразователя (выпрямителя). Нагрузка преобразователя в виде исполнительного двигателя постоянного тока *5* включена между нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора и точкой соединения уравнительных реакторов. В систему управления тиристорного преобразователя входят шесть устройств управления, образующих два блока управления, и шесть групп фазосмещателей, образующих блок пилообразного напряжения.

Действие тиристорного преобразователя основано на том, что выпрямляющий элемент—тиристор проводит ток от анода к катоду в том случае, если к его аноду приложено напряжение, положительное по отношению к катоду, а на управляющий электрод подан положительный по отношению к катоду отпирающий импульс достаточной

ширины (10 электрических градусов). Изменение величины выходного напряжения (среднего за период) тиристорного преобразователя производится изменением фазы отпирающего импульса. Управление тиристорным преобразователем в данном случае производится линейно-согласованно. Это означает, что отпирающие импульсы подаются сразу в анодную и катодную группы выпрямительного моста, причем углы управления выбираются таким образом, чтобы на выходе тиристорного преобразователя средние значения выпрямленного напряжения каждой из групп были равны между собой. Соотношения фазовых углов между отпирающими импульсами обеих групп выдерживаются так, чтобы сумма их была равна 180°. Причем отсчет углов управления производится от точек естественного зажигания, как показано на рис. 39, *в*. На рисунке показана работа тиристорной группы одной фазы. При рассмотрении полной картины трехфазного выпрямителя можно наблюдать, что суммарное напряжение на выходе тиристорного выпрямителя будет равно нулю.

Управление преобразователем происходит следующим образом. Сигнал управления, пропорциональный заданным программой величине и скорости перемещения рабочего органа станка, поступает на корректирующее звено *1* (см. рис. 39, *а*), выполняющее роль фильтра, так как на вход тиристорного преобразователя необходимо подавать постоянное напряжение, не содержащее пульсации. При этом фильтр должен иметь такие параметры, которые не вносили бы заметного отставания по фазе. Фильтр собран на дросселях и конденсаторах. Пройдя фильтр, управляющий сигнал суммируется в корректирующем звене *1* с сигналом обратной связи, поступающим от тахогенератора *6*, и передается на вход блока пилообразного напряжения *2*, где он складывается с пилообразным напряжением фазосмещающего устройства. Управление преобразователем в данной схеме происходит по так называемому вертикальному принципу. Сущность его заключается в том, что изменение фазы отпирающего импульса производится путем вертикального смещения кривой пилообразного напряжения с помощью наложения на него постоянного напряжения управляющего сигнала (рис. 39, *г*). Когда управляющий сигнал отсутствует, то положительная и отрицательная полуволны пилообразного напряжения симметричны относительно оси времени

(рис. 39, *г*, кривая *1*) и при подаче пилообразного напряжения на вход устройства управления (рис. 39, *а*) оно выдаст отпирающий импульс, обеспечивающий нулевой уровень выходного напряжения с тиристорного преобразователя. При этом, так как отпирающие импульсы с управляющего блока *3* подаются симметрично как в анодную группу тиристоров, так и катодную, среднее напряжение на выходе тиристорного преобразователя равно нулю. Но мгновенные напряжения не равны нулю, вследствие чего между катодной и анодной группами тиристоров возникает уравнительное напряжение, вызывающее уравнительный ток. Чтобы ограничить величину уравнительного тока, поставлены реакторы в цепи двигателя *5* (рис. 39, *б*).

Если же на вход тиристорного преобразователя подать минус управляющего напряжения на общий провод катодной группы источника пилообразного напряжения, а плюс на общий провод анодной группы блока пилообразных напряжений, то пилообразное напряжение алгебраически суммируется с постоянным напряжением управляющего сигнала и пройдет через нуль раньше, т. е. произойдет вертикальное смещение пилообразного сигнала на угол φ_2 (см. рис. 39, *г*, кривая *2*). Следовательно, момент выдачи отпирающего импульса в катодной группе тиристорного преобразователя сместится влево (рис. 39, *д*, случай *1*), а в анодной группе — вправо. В результате на выходных клеммах тиристорного преобразователя появится напряжение, имеющее постоянную составляющую. Ток в обмотке двигателя пойдет от катодной группы к нулевой точке вторичной обмотки силового трансформатора. Если же на вход тиристорного преобразователя подать управляющий сигнал обратной полярности, то отпирающие импульсы в катодной группе тиристоров сместятся вправо, а в анодной — влево (рис. 39, *д*, случай *2*) и на входе тиристорного преобразователя появится напряжение обратной полярности. Регулируя величину входного сигнала, мы можем регулировать, таким образом, и величину выходного напряжения.

Следует сказать, что исчезновение управляющих импульсов во время работы тиристорного преобразователя неизбежно приводит к короткому замыканию из-за опрокидывания инвертора. Это происходит вследствие того, что противо-э. д. с. двигателя при «догорании» тиристоров складывается с напряжением трансформатора.

В электроприводах серии ПТЗР используются трансформаторы трехфазной серии ТТ, предназначенные для работы с полупроводниковыми выпрямителями, имеющие повышенное значение напряжения короткого замыкания, что обеспечивает ограничение токов короткого замыкания на уровне $(7 \div 14)\ I_{ном}$.

Электродвигатели серии ПБСТ изготовляются со встроенными тахогенераторами. Закрытое необдуваемое исполнение двигателей этой серии обеспечивает сохранение условий охлаждения независимо от скорости вращения, что позволяет полностью использовать двигатель по моменту на малых скоростях. В переходных процессах двигатель допускает четырехкратную перегрузку по току.

Вопросы теоретических расчетов и практического применения электропривода в станках с системами ЧПУ подробно освещены в литературе [6, 30, 36, 38, 43, 44].

Создание мощных полупроводниковых управляемых выпрямителей тиристоров определило существенный скачок в развитии электропривода металлорежущих станков с ЧПУ. Основные достоинства электроприводов с тиристорами: высокое быстродействие; высокий к. п. д. по сравнению со всеми остальными электроприводами; небольшая мощность управления; компактность; более высокая надежность по сравнению с гидроприводом; возможность питания привода от промышленной сети.

Удовлетворительная работа гиристоров и оборудования, в котором они применяются, часто зависит в значительной степени от их способности выдерживать без повреждений эпизодически возникающие режимы значительной перегрузки по току. Поэтому в системах управления электроприводом подобного типа применяется система защиты от сверхтоков. Так как тепловое и электродинамическое действие токов короткого замыкания в элементах схем с линейными характеристиками пропорционально квадрату тока, то значение соответствующей защиты в подобных системах очевидно.

Основные элементы защиты могут быть разделены на две группы. Первая группа включает в себя те устройства, которые обеспечивают защиту установки посредством прерывания и предотвращения протекания аварийного тока, а вторая — те элементы, которые за счет своего сопротивления ограничивают величину или скорость нарастания аварийного тока. К элементам первой группы относятся автоматические выключатели и плавкие предо-

хранители, которые отключают всю схему от источника питания, отделяют поврежденные вентили или отключают от нагрузки при повреждениях в цепях нагрузки. Элементы второй группы здесь не будут рассмотрены. Более подробно элементы защиты рассмотрены в работах [36, 43].

В электроприводах типа ПТЗР в качестве защиты от коротких замыканий и перегрузок применен автоматический выключатель. Поэтому при эксплуатации необходимо тщательно соблюдать условие, что при коротком замыкании нарастание тока происходит очень быстро, и чтобы обезопасить остальную схему от повреждений, автомат должен отключать систему до достижения максимально возможного значения тока. Другой разновидностью неисправностей, возникающих в тиристорных преобразователях, является повреждение тиристоров вследствие возникающих в схемах перенапряжений.

В большинстве обычных схем выпрямления, питаемых от сети переменного тока, максимальное обратное напряжение на вентиле равно амплитуде линейного напряжения питающей сети. В инверторных схемах повторяющееся максимальное обратное напряжение тиристора определяется параметрами схемы. Как прямое, так и обратное напряжения могут значительно изменяться при нормальной работе схемы при изменениях тока, коэффициента мощности, нагрузки, угла проводимости и других величин.

При переключении цепей наибольшее перенапряжение наблюдается при отсутствии нагрузки. Поэтому при выявлении перенапряжений подобного вида установку необходимо испытывать без нагрузки, причем во избежание пробоя мощных вентилей их необходимо на время испытаний заменить вентилями с меньшими номинальными токами.

Вследствие лавинообразного процесса нарастания тока тиристоры отпираются очень быстро. Подобно другим быстродействующим коммутирующим устройствам тиристоры способны возбуждать переходные процессы в схеме, в которой они работают, и, в частности, в питающей сети. Таким образом, тиристор можно рассматривать как генератор напряжений, который может служить источником весьма сильных радиопомех или создавать наводки на цепи других тиристоров.

Существует два вида радиопомех; помехи, распространяемые по проводам, и излучаемые помехи. В первом слу-

чае энергия высокочастотных колебаний, возбуждаемых тиристором при его переключении, распространяется по питающей сети, действующей подобно линии передачи, и попадает в другую установку. Второй вид радиопомех связан с излучением высокочастотной энергии непосредственно рассматриваемым устройством.

Можно наблюдать и обратное явление; имеется в виду действие схемы с тиристорами как «приемника» помех, вызванных переходными процессами, протекающими в любой точке системы. Эти переходные процессы действуют либо на пусковую цепь, либо непосредственно на «анод» тиристора, либо на то и другое. В результате наводки эти помехи могут заставить подвергаемую воздействию систему полностью или частично следовать за другой системой. На практике встречаются различные типы неполного включения тиристоров от действия помех в зависимости от характера пусковой цепи тиристоров. При этом необходимо различать два случая: 1) влияние на схему управления непосредственно со стороны питающей сети; 2) влияние на схему управления и, в частности, на генератор импульсов со стороны цепи управляющего электрода.

Оба вида помех могут привести к преждевременному срабатыванию пусковой цепи, вызывая либо ложное отпирание одного тиристора, либо одновременное отпирание всех или части тиристоров.

Успешное использование тиристоров в большой степени зависит от правильного их охлаждения. При чрезмерном повышении температуры перехода тиристора может наблюдаться постепенное ухудшение характеристики и прибор может выйти из строя в результате потери тепловой устойчивости или расплавления припоев. Схема, в которой тиристор используется, может отказать в работе и до расплавления припоя или потери тепловой устойчивости, так как недостаточное охлаждение может привести к снижению прямого напряжения переключения, повышению времени восстановления управляемости тиристора, изменяя этим другие параметры установленных в схеме тиристоров.

В процессе эксплуатации электрических машин в станках с ЧПУ с течением времени изменяется настройка режимов управления, наблюдается износ элементов вращающихся частей двигателей и др. Многолетний анализ отказов электрических машин показывает, что более 95% аварий происходит от повреждений их обмоток, а именно, от

сгорания изоляции обмоток, пробоя изоляции, обрыва или механического повреждения обмоток. Для машин постоянного тока характерным является износ щеток и коллекторов. Износ щеток в процессе эксплуатации зависит от механических и электрических факторов. К первым относится состояние поверхности и линейная скорость коллектора, удельное давление щеток, вибрация машины. Износ щеток зависит от средней величины давления на щетки и от пульсации тока; нередко износ увеличивается под влиянием искрения [5, 11, 18, 30, 38].

9. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ

Вследствие высокой точности, требующейся от станков с системами ЧПУ при большом диапазоне измерений, применяемые в них датчики положения обладают рядом особенностей, значительно отличающих от их измерительных устройств приборов, применяемых для измерения линейных перемещений. Так, например, многие измерительные устройства электрического типа имеют точность 1—2 мкм при диапазоне измерения лишь 100—200 мкм, что дает относительную погрешность порядка 1% и считается нормальной точностью для такого типа устройств. Для станков с ЧПУ допускается погрешность порядка 10—20 мкм при диапазоне измерения 1000 мм и более, что дает относительную погрешность измерения порядка 0,001%. Такую высокую точность невозможно обеспечить обычными средствами, применяемыми при электрических измерениях малых перемещений [19].

В связи с тем, что для контурных систем ЧПУ станков для грубых работ достаточна разрешающая способность порядка 0,01—0,02 мм и даже грубее, а погрешность может быть еще больше, в них в качестве датчиков применяют стандартные двухфазные микромашины переменного тока в режиме фазовращателей, кинематически соединенные с управляемым объектом, т. е. применяют косвенное измерение величины перемещения. Практическое применение в качестве датчиков положения в фазовых системах ЧПУ нашли стандартные вращающиеся трансформаторы типа ВТМ-1В (рис. 40) и многополюсные вращающиеся трансформаторы-редусины типа Р-15 и Р-64.

Вращающиеся трансформаторы представляют собой универсальную четырехобмоточную электрическую машину, в конструктивном отношении похожую на асин-

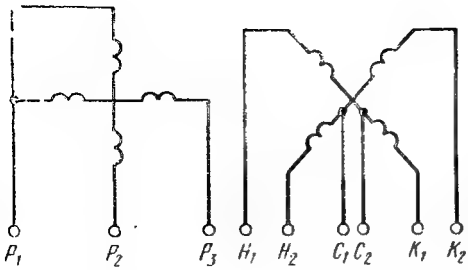


Рис. 40. Схема обмоток вращающегося трансформатора типа ВТМ:

H_1, H_2 — начала обмоток статора; K_1, K_2 — концы обмоток статора; C_1, C_2 — средние точки обмоток статора; P_1 — средняя точка обмотки ротора; P_2, P_3 — выводы обмоток ротора

хронный электродвигатель с фазовым ротором или контактный сельсин с постоянным воздушным зазором по всей окружности. На статоре и роторе вращающегося трансформатора уложены по две обмотки, каждая из которых сдвинута относительно другой на 90 электрических градусов. Обмотки выполняются со строго одинаковыми параметрами (одинаковое число витков обмотки с постоянным сечением обмоточного провода, одна и та же схема соединений секций). Схема расположения обмоток вращающегося трансформатора и маркировка выводных концов представлены на рис. 41.

Такой вращающийся трансформатор дает отклонение от синусоидальности $\pm 0{,}3\%$, коэффициент трансформации $1 \pm 0{,}05$, ток холостого хода 43 мА при напряжении 26 В и соответствует входному сопротивлению 600 Ом, номинальная частота 400 Гц.

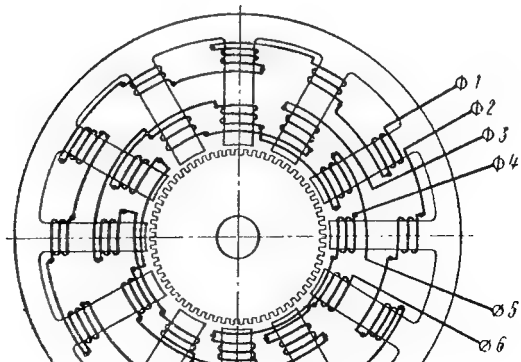


Рис. 41. Схема соединения обмоток редусина Р-15:

1—6 — концы выводов обмоток

При подаче на одну из обмоток статора (или ротора) переменного напряжения вида $e_0 = u_m \sin(\omega t)$ на обмотке ротора (или статора, соответственно) индуцируется переменное напряжение e_1, амплитуда которого изменяется синусоидально при вращении ротора вращающегося трансформатора:

$$e_1 = u_m \sin(\Omega t + \alpha) \sin(\omega t),$$

где Ω — скорость вращения ротора;

α — начальное угловое положение ротора.

На второй обмотке ротора (или статора) при этом индуцируется переменное напряжение e_2, амплитуда которого изменяется при вращении ротора по косинусоиде:

$$e_2 = u_m \cos(\Omega t + \alpha) \sin(\omega t).$$

Ротор вращающегося трансформатора механически связывается с управляемым объектом так, что одному обороту ротора соответствует перемещение объекта L.

На станках с фазовой системой ЧПУ перемещению $L = 0{,}64$ мм соответствует один оборот вращающегося трансформатора, для этого применен измерительный редуктор, связывающий рабочий орган станка с датчиком. Применение редуктора повышает погрешность измерения главным образом за счет появления люфтов, одновременно с этим, вследствие разгона и торможения рабочего органа, возникают значительные усилия на зубьях измерительного редуктора. Компромиссным решением явилось применение в качестве датчиков положения вращающихся трансформаторов с электрической редукцией, что избавило от необходимости создания измерительного редуктора.

Одним из типов такого многоголосного трансформатора, разработанного А. П. Гусевым и В. М. Киселевым, является датчик положения — редусин, устанавливаемый на станках типа ФП-7. Редусин является бесконтактным устройством. Схема и расположение обмоток редусина представлены на рис. 42. Полюса ротора расположены под углом к его оси (на рисунке не показано). Электрическая редукция зависит не только от числа полюсов статора, но и от угла наклона полюсов ротора.

На каждом полюсе имеется обмотка возбуждения и выходная обмотка. Обмотки возбуждения *1—2* (см. рис. 41) включены так, чтобы полярности соседних полюсов чередовались. Выходные обмотки соединены последовательно

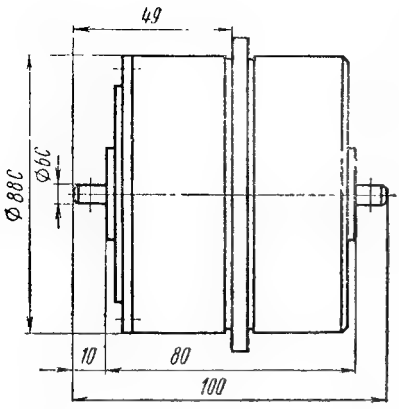


Рис. 42. Внешний вид редусина Р-15

через полюс так, что образуются две выходные обмотки, на одной из которых (выводы 3 и 4) получается сигнал переменного тока; амплитуда последнего пропорциональна с высокой степенью точности sin ($n\alpha$), а на другой (*5—6*) пропорциональна cos ($n\alpha$), где n — электрическая редукция, а α — угол поворота ротора.

На рис. 42 представлен общий вид редусина Р-15, у которого коэффициент трансформации равен 6,5 при частоте 250 Гц и напряжении 36 В.

Большое распространение в фазовых системах ЧПУ, в силу своей простоты, нашла схема однофазного фазовращателя, приведенная на рис. 43, которую необходимо рассмотреть, так как она может качественно влиять на работу всей системы. Иногда такую схему фазовращателя называют схемой с ращепленным магнитным потоком вращающегося трансформатора. Как видно из схемы, входное напряжение подается на одну обмотку ротора вращающегося трансформатора или обмотку возбуждения редусина. Выходной сигнал снимается с цепочки *RC*, включенной на две взаимно перпендикулярные выходные обмотки. Ток, протекающий по роторной обмотке, создает магнитный поток, который наводит в статорных обмотках соответствующую э. д. с. Каждая э. д. с. обмоток нагружена на цепочку *RC*. Выходное напряжение схемы равно

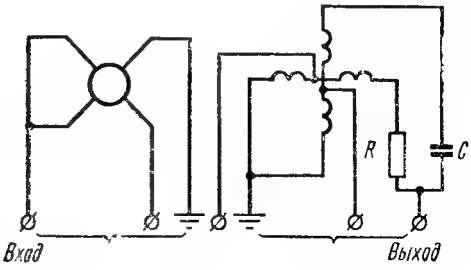


Рис. 43. Схема включения вращающегося трансформатора с расщепленным магнитным полем

сумме напряжений, падающих на элементах R и C цепочки от э. д. с. статорных обмоток вращающегося трансформатора.

Вывод математической зависимости амплитудных и фазовых ошибок данной схемы рассмотрен в работах [8, 19]; здесь приведем только окончательные значения. Схема питания вращающегося трансформатора по принципу расщепления магнитного поля принципиально вносит фазовую и амплитудную ошибки при вращении ротора. Количественно эти ошибки будут тем больше, чем выше скорость вращения ротора вращающегося трансформатора, и в некоторых случаях могут являться причиной существенных фазовых искажений в системах управления станков. Максимальное значение фазовая ошибка имеет при углах поворота ротора вращающегося трансформатора, кратных $\pi/4$, и численно может быть определена. Удобнее амплитудную ошибку вращающегося трансформатора вычислить в процентах к номинальному напряжению

$$\frac{\Delta u}{u_0} \approx \left\{ \sqrt{1 + \Delta [2 + \cos(\Omega t)]} - 1 \right\} \ 100\%,$$

где Δu — ошибка амплитуды выходного сигнала;

u_0 — номинальное напряжение входа;

$$\Delta = \frac{\Omega}{\omega_0};$$

Ω — угловая скорость;

ω_0 — номинальная частота.

Фазовая ошибка δ_φ может быть найдена как

$$\operatorname{tg}(\delta_\varphi) \approx -\frac{\Delta}{2} \sin(\Omega t).$$

При использовании данной схемы возникают также фазовые и амплитудные ошибки при отклонении частоты питающего напряжения от номинального значения; в этом случае амплитудная ошибка

$$\frac{\Delta u}{u_0} \approx \left[\sqrt{1 + \Delta(1 + 2\sin^2\theta)} - 1 \right] \ 100\%,$$

а фазовая ошибка

$$\operatorname{tg}\delta_\varphi \approx \Delta \sin^2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right),$$

где θ — угол поворота ротора относительно статорной обмотки.

Погрешность вращающегося трансформатора также обусловлена точностью изготовления; это выражается в неравенстве активных и индуктивных сопротивлений обмоток ротора и статора, неперпендикулярностью обмоток, синусоидальностью изменения взаимной индукции в зависимости от угла поворота ротора и т. д. [8, 19, 32].

§ 10. ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ И ТРЕНИЯ В СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧАХ, ДАТЧИКАХ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УЗЛАХ

В системах автоматического управления и станках с числовым программным управлением широко применяют зубчатые и винтовые передачи высокой точности для следующих целей:

1) механического согласования силового привода и нагрузки (так как часто двигатель развивает большую скорость и малый момент, а нагрузке необходимо передать большой момент и малую скорость);

2) изменения направления вращения и преобразования линейного перемещения в угловое, или наоборот, в датчиках обратной связи по положению или по скорости;

3) изменения масштаба редукции в датчиках обратной связи.

Наличие трения и зазоров в зубчатых и винтовых передачах станков с ЧПУ вызывает появление зоны нечувствительности, которая приводит к неоднозначности регулировочной характеристики. Вообще все характеристики системы при наличии сухого трения и зазоров теряют свою однозначность.

Под зоной неоднозначности понимают диапазон изменения входного сигнала, в котором каждому значению сигнала может соответствовать некоторое множество значений выходных сигналов, зависимых от направления движения системы и ее предыдущего состояния. Это явление нежелательно в системах автоматического управления, так как приводит к автоколебаниям в замкнутой системе числового программного управления.

Под зоной нечувствительности понимают зону застоя, мертвую зону — диапазон значений входной величины элемента, при котором выходная величина его равна нулю. В статической характеристике (рис. 44) элемент

зоны нечувствительности представляет собой участок с нулевой ординатой. Величина зоны нечувствительности определяется пороговым значением $u_{вх}$, начиная с которого при увеличении или уменьшении $u_{вх}$ выходная величина $u_{вых} \neq 0$. В элементах систем автоматического управления эта величина появляется, например, из-за перекрытий гидравлических золотников, сухого трения в подвижных частях станков, зазоров в зубчатых и винтовых передачах и т. п. Уравнения нелинейной характеристики, имеющей зону нечувствительности и участки линейности, имеют вид

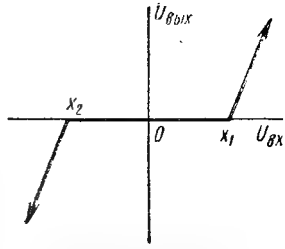


Рис. 44. Характеристика нечувствительности

$$u_{вых}=\begin{cases} k(u_{вх}-x_1) & \text{при } u_{вх} > x_1 \\ 0 & \text{при } -x_1 < u_{вх} < x_2 \\ k(u_{вх}-x_2) & \text{при } u_{вх} < -x_2. \end{cases}$$

Характеристика этой нелинейности изображена на рис. 44.

Трение в зубчатых передачах следящих систем играет весьма важную роль, так как главная часть статической ошибки, кроме неточности выявителя рассогласования, обусловлена трением зубчатых колес. Это трение может вызываться чрезмерно плотным зацеплением зубчатых колес, погрешностями формы зубьев, колебаниями шага и различными поверхностными дефектами зубьев. Ошибка зубчатой и винтовой передач складывается из ошибок отдельных зубчатых колес и винтовых пар.

Если выявитель рассогласования присоединен непосредственно к управляемому валу (например, в разомкнутой импульсной системе ЧПУ, где распределяющая втулка гидроусилителя присоединена непосредственно к валу гидродвигателя), любая ошибка винтовой передачи, находящейся между двигателем и управляющим валом, не имеет существенного значения, так как это звено охвачено обратной связью. Однако, если управляющий вал связан зубчатой передачей с прибором, выявляющим рассогласование (например, датчик обратной связи по положению или датчик обратной связи на сервопоршне, контролирующие положение рабочих органов в фазовой замкнутой

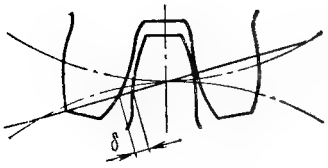


Рис. 45. Кинематическая погрешность зубчатого колеса

системе ЧПУ), ошибка в этой передаче прямо отразится на ошибке следящей системы. Например, в обратной связи по положению, в фазовой системе ЧПУ, небольшой зазор (3°), введенный в ранее устойчивую систему, может сделать ее неустойчивой. По мере износа зубчатых передач система становится все более и более колебательной, и в конце концов наступает неустойчивость управления системой-станком.

Хотя трение и зазор вызываются различными причинами и явлениями, они могут появляться в одном и том же зацеплении, если начальные окружности не будут концентричны относительно ведущих валов. При вращении зубчатых колес их эксцентриситет будет создавать избыточное трение на одной части оборота и зазор на другой части.

Ошибку, вызываемую зазором (рис. 45), можно вычислить отдельно от ошибок зубчатых колес. Если два зубчатых колеса, выполненных идеально по зацеплению, собраны с межцентровым расстоянием, бóльшим теоретического на величину d, то в результате возникает зазор δ, который может быть вычислен по формуле

$$\delta = 2d \operatorname{tg}(\alpha).$$

где α — угол зацепления в град.

Если d выражено в миллиметрах, то зазор по начальной окружности тоже будет получен в миллиметрах. Зазор в угловой мере можно получить из зависимости

$$\beta = \frac{2d}{r} \sin(\alpha),$$

где r — радиус колеса, у которого определяется угловой зазор.

Если зацепляющиеся в паре зубчатые колеса эксцентричны, их начальные окружности не касаются друг друга; для них можно найти максимальный зазор по вышеприведенным формулам, предполагая, что в момент зацепления в наивысших точках эксцентриситета колес отсутствует зазор, а общий эксцентриситет равен величине d.

Сухое трение золотника является основной нелинейностью статического электрогидравлического усилителя,

которая может при определенном сочетании параметров существенно влиять на его характеристику. Сухое трение золотника увеличивает усилие (давление) трогания, зону нечувствительности и запаздывания.

Повышенное трение золотника вызывается перекосами пружин мембран подвески электромеханического преобразователя, односторонним прижатием к втулке силами давления жидкости; недостаточной осцилляцией золотника и другими факторами.

Глава III

Влияние регулировок и настроек на устойчивость и надежность работы станка с системой ЧПУ

§ 1. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МАГНИТНОМ НОСИТЕЛЕ

В качестве программоносителя на некоторых станках с системами ЧПУ пока используется магнитная лента, обычно характеризуемая двумя основными рабочими параметрами: разрешающей способностью (оцениваемой максимально возможной плотностью записи) и уровнем воспроизводимого сигнала (отдачей головки воспроизведения). При оценке эксплуатационных свойств магнитного носителя удобнее пользоваться параметрами, которые определяются просто и быстро и не зависят от элементов измерительной аппаратуры. Таким параметром является, например, уровень воспроизводимого сигнала.

Хорошая лента обладает равномерной чувствительностью как по длине, так и по ширине. Ее очень просто измерить при помощи контрольной записи, произведенной с постоянным уровнем сигнала. Контрольная запись воспроизводится на лентопротяжном механизме, при этом за колебаниями уровня следят по стрелочному или регистрирующему прибору. Контрольная запись должна производиться на определенных частотах, так как результат измерений будет зависеть от того, какая записывалась частота (на высоких частотах колебания чувствительности больше). Для фазовых систем ЧПУ максимальная частота записи 300 Гц, для импульсных систем частота записи импульсов 800 Гц, при частоте модуляции 2500 Гц.

Для измерения параметров магнитной ленты при скорости ее протягивания 50 мм/с используется лентопротяжный механизм от пульта управления типа ПФСТ-12-500, при скорости 200 мм/с — лентопротяжный механизм от пульта ПРС-3К. Оба лентопротяжных механизма (рис. 46)

предназначены для воспроизведения записи программ на магнитной ленте *1* и имеют стандартные магнитные головки *2*. Измерительными средствами являются: звуковой генератор *8* с диапазоном частоты от 0 до 20 кГц и значениями выходного напряжения до 5 В (генератор служит для записи тарировочного сигнала на осциллограмму); два ламповых вольтметра *3* и *7* для измерения напряжения сигнала, считываемого с магнитной ленты; измерительный усилитель *4* с пределом измерения 1—10 мВ для усиления сигнала с магнитной ленты и согласования магнитной головки с входом регистрирующего шлейфового осциллографа *6*, регистрирующего изменение уровня сигнала на бумажную ленту (киноленту) по всей длине записанной контрольной сигналограммы, и цифровой частотомер *5* для измерения частоты записанных сигналов, считываемых с магнитной ленты.

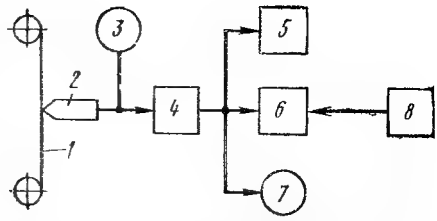


Рис. 4б. Схема измерения параметров магнитного носителя

Для проведения измерений с различными типами магнитных лент, при записи сигналограммы должен быть установлен оптимальный ток записи, при котором во время воспроизведения достигается максимальный уровень сигнала. Измерения, проводимые с помощью такой установки, позволяют определить изменения параметров магнитной ленты при их эксплуатации. Изменения, происходящие в магнитном носителе, зависят от количества прогонов ленты, времени хранения записи, температуры и других условий эксплуатации.

Основными факторами, влияющими на надежность передачи информации через магнитную ленту, являются колебания чувствительности и собственные шумы ленты [7].

При сматывании записанной ленты в рулон большие по величине сигналы вызывают нежелательные явления— намагничивание соседнего витка ленты [7, 42]. Хотя это копирование очень слабое, но все же мешает при записи импульсных сигналов, так как, попадая в паузы между сигналами, оно вызывает опережающее или запаздывающее эхо. Копирующее действие усиливается при повышенной механической нагрузке и силовых магнитных полях

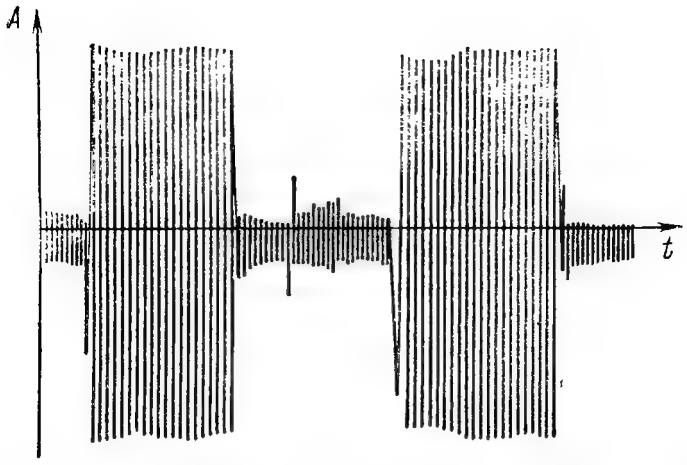


Рис. 47. Осциллограмма импульсного сигнала, записанного на магнитной ленте, с явлением копирэффекта (t — время, A — амплитудное значение сигнала)

(поток рассеяния трансформаторов и электрических машин), повышении температуры. Вначале, вследствие контакта с лентой, несущей запись, сразу появляется очень слабая намагниченность, которая увеличивается с течением времени и под действием повышенной температуры. Если сделать запись программы движения рабочего органа станка и измерить сигнал с помощью осциллографа, то можно увидеть явление копирэффекта. На рис. 47 показано явление копирэффекта при воспроизведении импульсных сигналов. Измерение производилось на лентопротяжном механизме пульта ПРС-3К при скорости протягивания ленты 200 мм/с, использовалась лента типа 6 при сроке хранения магнитной ленты в течение 6 месяцев. Величина сигнала 9 мВ, величина сигнала копирэффекта 0,9—1,0 мВ.

Информация на магнитном носителе может быть потеряна по многим причинам [7, 16, 42]. Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться при эксплуатации магнитных лент, является срок хранения записанной информации на лентах. Известно, что во время хранения остаточная намагниченность ленты может уменьшаться. При записи информации на магнитную ленту может быть допущено некоторое уменьшение сигнала, так как снижение уровня воспроизводимого сигнала на 10% едва ли

будет заметно, а вот большее уменьшение сигнала ведет к отказам системы ЧПУ. Был проведен такой эксперимент: на лентах различного типа была записана информация с одним уровнем тока и одинаковой частотой сигналов с одной записывающей головки. При воспроизведении были проведены измерения уровня сигнала, считываемого с магнитных лент при одной и той же скорости протягивания. Измерения производились осциллографом и импульсным вольтметром В3-13. Затем ленты, магнитная головка и приборы были законсервированы, а через три года измерения были снова повторены. Результаты измерений приведены в табл. 1. На основании этих испытаний можно сделать вывод, что при длительном хранении магнитных лент уровень сигнала падает.

Таблица 1

Изменение свойств магнитной ленты во времени

Дата проведения испытания	Параметр	Тип магнитной ленты					
		CRL	CR	6	Сигма	6В	2В
24.12.68 г.	Величина импульса в мВ	5,1	4,8	4,2	4,5	5,2	4,5
	Величина синусоидального сигнала 2,5 кГц в мВ	9,0	8,4	7,2	7,6	9,0	7,6
18.01.72 г.	Уменьшение величины импульса в %	21,5	20,8	23,8	24,4	19,2	6,6
	Уменьшение синусоидального сигнала 2,5 кГц в %	22,2	22,2	10,5	18,4	17,7	2,6

Более серьезное влияние при записи информации на магнитный носитель оказывает износ. Износ происходит вследствие скольжения рабочего слоя по головке, направляющим и другим неподвижным поверхностям лентопротяжного механизма при перемотке магнитной ленты и при воспроизведении звука. Ухудшение свойств ленты вызывается соскабливанием рабочего слоя.

Длительность использования магнитной ленты до наступления износа зависит от ряда причин: температуры, шероховатости поверхностей, соприкасающихся с лентой, скорости ленты, коэффициента трения, влажности и др. Проведенное исследование процесса износа и влияния этого износа на изменение величины уровня считываемого сигнала показывает, что при многократном использовании ленты при уменьшении толщины магнитного слоя в 2 раза сигнал полезной отдачи ленты падает в 1,7 раза. Отсюда следует, что в процессе эксплуатации необходимо постоянно контролировать толщину магнитного слоя и при этом ограничивать срок службы магнитных лент.

§ 2. РЕГУЛИРОВКА И НАСТРОЙКА МАГНИТНОЙ ГОЛОВКИ

Для правильного воспроизведения сделанной записи необходима тщательная установка щели магнитной головки перпендикулярно направлению движения ленты т. е. обе щели воспроизводящей и записывающей головки должны быть параллельны. Если щель воспроизводящей головки образует некоторый угол с направлением магнитного штриха на ленте, то возникают линейные искажения частотной характеристики. Прежде чем начать воспроизведение программ на магнитной ленте с раздельными пультами, т. е. когда запись производится на одном устройстве, а воспроизведение — на другом, нужно обратить особое внимание на параллельность установки щелей магнитных головок. Это достигается тем, что записываются сигналы той частоты, которая используется в данных системах ЧПУ, и головка воспроизведения устанавливается по максимуму отдачи. При этом надо следить, чтобы головка устанавливалась действительно на главный максимум щелевой функции, а не на соседний максимум. Посредством качания головки в небольших пределах правильное положение находится без больших затруднений.

Если предполагается обмен записями между несколькими станками с системами ЧПУ, то недостаточно установить щели каждой магнитной головки лентопротяжного механизма системы параллельно по отдельности, в этом случае щели головок всех лентопротяжных механизмов должны быть параллельны друг другу.

На записывающей аппаратуре с примерно правильно установленной головкой делается запись сигналов высокой частоты на возможно тонкой ленте, а воспроизводящие головки качанием устанавливают на максимум отдачи. Это положение отмечается на установочном винте. Затем лента осторожно перематывается и воспроизводится головкой с обратной стороны. При этом зазор примерно равен толщине основы плюс толщина рабочего слоя. Имевшийся при этом угол перекоса записи получит при воспроизведении противоположный знак. Поскольку воспроизведение из-за большого зазора приводит к значительным потерям напряжения, то усиление должно быть увеличено до 1000—3000 раз, а измерение выходного напряжения должно производиться через узкополосный фильтр, чтобы исключить влияние помех. При этом воспроизводящая головка вновь устанавливается на максимум отдачи и отмечается положение установочного винта. Тогда правильное положение головки получается из среднего значения обеих установок. Весь процесс целесообразно повторить несколько раз, этим достигается оптимальная установка.

При выборе частоты записи надо идти на компромисс: с одной стороны, она должна быть по возможности высокой, чтобы гарантировать острый максимум установки головки, с другой стороны, при воспроизведении высокой частоты потери напряжения настолько велики, что, несмотря на использование очень узкополосного фильтра при воспроизведении с обратной стороны ленты, полезное напряжение перекрывается напряжением шумов.

Более простой способ установки щели магнитной головки лентопротяжного механизма системы ЧПУ заключается в применении сигналограмм, которые для однотипных систем станков можно получить с одного устройства записи. Установка по этому способу не обеспечивает столь высокой точности, как по описанному выше способу, но достаточна для систем станков с фазовой и импульсной системами управления. Головка при применении тест-программы устанавливается по максимальному выход-

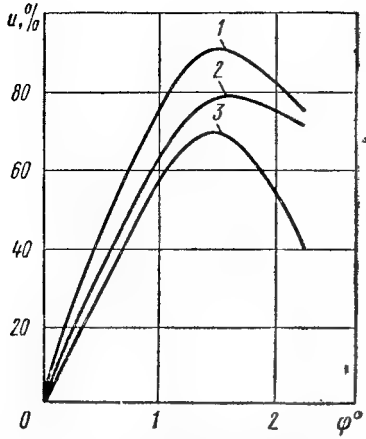


Рис. 48. Изменение уровня сигнала считывания при изменении угла наклона магнитной головки (φ — *угол отклонения магнитной головки от правильной установки*; *u* — *изменение уровня сигнала*):

1 — по дорожке координаты *y*; *2* — по дорожке координаты *x*; *3* — по дорожке координаты *z*

ному напряжению при записи высокой частоты на типовой магнитной ленте.

На сколько велика ошибка от угла перекоса магнитной головки при скорости движения ленты 50 мм/с, видно из графиков на рис. 48. Измерение уровня сигнала производилось с помощью установки, изображенной на рис. 49, и схемы измерения параметров магнитной ленты (см. рис. 46). При этом использовалась многодорожечная магнитная головка типа ПФП-1; тип магнитной ленты — 2В и частота записанного сигнала на тест-программе 277 Гц. Кривые не пропорциональны из-за разброса обмоточных данных головок и разной величины рабочего зазора.

Условием высококачественного воспроизведения сигнала в системах ЧПУ является постоянство уровня сигнала. Под этим понимается, что все частоты, воспроизводимые системой в пределах ее диапазона, передаются без искажений амплитуды, т. е. система не вносит линейных искажений. Но если сделать запись сигналов на магнитной ленте всех частот передаваемого диапазона постоянным по величине током записи и воспроизвести эти сигналы, то получается нелинейная частотная характеристика. На рис. 50 показана зависимость изменения уровня сигнала от изменения частоты записанного сигнала на магнитной ленте. Измерение

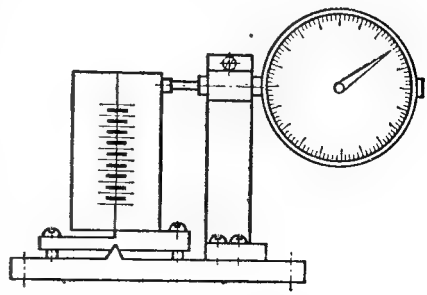


Рис. 49. Установка для исследования влияния перекоса магнитной головки

производилось на лентопротяжном механизме фазовой системы ЧПУ при воспроизведении записи на магнитной ленте, где частота записываемого сигнала для управления системой изменялась в пределах 215—285 Гц. В фазовой системе ЧПУ для увеличения сигнала, считываемого с магнитной головки, контур магнитная головка — магнитная лента настраивался в резонанс на частоту 250 Гц, т. е. параллельно обмоткам головки подключалась емкость. В данном измерении параллельно обмоткам были подключены конденсаторы емкостью 0,4 мкФ.

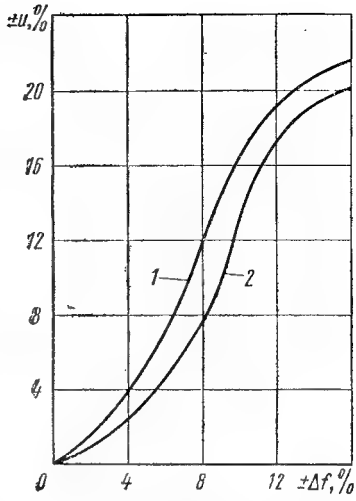


Рис. 50. Изменение уровня сигнала при изменении частоты записанного сигнала

На графике по оси ординат откладывалось изменение уровня считываемого сигнала в процентах от номинального, полученного при записи сигнала на частоте 250 Гц. По оси абсцисс откладывалось изменение частоты в процентах в сторону увеличения или уменьшения от номинального значения (250 Гц). Кривая *1* характеризует изменение уровня сигнала при уменьшении частоты записанного сигнала ($f_0 - \Delta f$); а кривая *2* — при увеличении частоты ($f_0 + \Delta f$). Несимметричность кривых объясняется различием резонансных свойств магнитной головки при изменении частоты считываемого сигнала.

Чтобы достичь линейной частотной характеристики, необходимо корректирующие мероприятия, которые могут применяться как в канале записи, так и в канале воспроизведения или могут быть поделены между обоими каналами.

Контур, образованный емкостью и индуктивностью обмотки головки, увеличивает величину сигнала при воспроизведении. Но от того, как подобраны элементы контура, зависит величина изменения воспроизводимого сигнала. На рис. 51 приведена зависимость изменения воспроизводимого сигнала от изменения емкости контура и

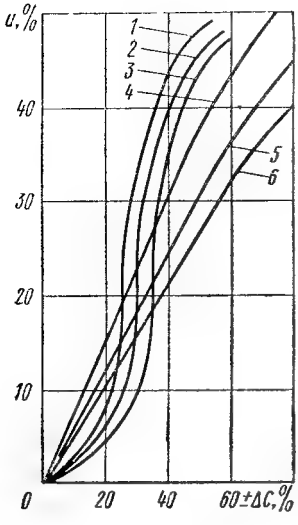


Рис. 51. Изменение уровня сигнала при изменении резонансной емкости магнитной головки

индуктивности головок; частота воспроизводимого сигнала при данном измерении постоянна.

На рисунке по оси ординат откладывалось изменение уровня считываемого сигнала с магнитной ленты головкой, настраиваемой в резонанс с помощью емкости. По оси абсцисс откладывалось изменение емкости в процентах от номинального значения, т. е. от емкости, при которой при считывании получен максимальный сигнал, считанный с магнитной ленты. Кривые *1*, *2* и *3* характеризуют изменение уровня считываемого сигнала при увеличении емкости конденсатора, а кривые *4*, *5* и *6* — при уменьшении емкости от номинального значения. Кривые *1* и *4* характеризуют считываемый сигнал с головки координаты *z*, кривые *2* и *5* — сигнал с координаты *x*, кривые *3* и *6* — с координаты *y*. Разброс изменения считываемого сигнала в зависимости от подбора резонансной емкости объясняется разбросом обмоточных данных головок, их расположением по дорожкам записи на магнитной ленте, различными размерами рабочих щелей.

Очевидно, для настройки магнитных головок в резонанс необходимо учитывать влияние на уровень воспроизводимого сигнала не только частоты записанного сигнала, но и индуктивности обмотки магнитной головки и емкости контура.

Пространственные потери могут влиять также на частотную характеристику при контактном воспроизведении сигнала. В магнитных системах, таких как трансформаторы, магнитные усилители, электромеханические реле и т. д., создание плотного механического контакта между частями магнитной цепи не означает, что между ними существует плотный магнитный контакт. Практически, если даже приняты меры для соединения этих частей, эффективная длина зазора между ними обычно бывает не менее 25 мкм [23, 42]. Причина, вызывающая это явление, определяется тем, что проницаемость магнитомягких материа-

лов, применяемых в трансформаторах и магнитных головках, зависит от механического воздействия на эти материалы ударов и обработки. Иногда достаточно легкой шлифовки головки, чтобы сильно изменить ее «отдачу». Очевидно, что и в реальных системах при действии на магнитные головки механических сил могут возникнуть подобные потери. Определить величину этих потерь или, другими словами, эффективный зазор практически довольно трудно. Была проверена «отдача» с магнитной головки в зависимости от сил, возникающих при сборке полублоков многодорожечных головок. Магнитная головка, полученная с завода-поставщика, была установлена в лентопротяжный механизм и проверен уровень сигнала считывания. После этого с помощью стяжных винтов была увеличена сила стягивания, смещение полублоков исключено, так как их фиксируют с помощью штифтов. После операции был повторно проверен уровень сигнала считывания, при этом уровень сигнала упал на 10%. Отсюда необходимо сделать вывод, что после перешлифовки и сборки полублоков магнитной головки необходимо учитывать силы их стягивания.

Особенностью пермаллоя — материала, применяемого для изготовления сердечников магнитной головки, является то, что при изменении его механических свойств изменяются и магнитные свойства пермаллоя. После перетяжки магнитной головки пластины сердечников головки были подвержены сильному напряжению, при этом резко ухудшились магнитные свойства материала, и сигнал, считанный такой головкой, уменьшился.

§ 3. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ И ОТДЕЛЬНЫХ БЛОКОВ

Чтобы обеспечить высокую точность работы, управляющая часть системы станка с ЧПУ должна иметь достаточно большой коэффициент усиления сигнала. Назначение усилительных элементов сводится главным образом к изменению величины вспомогательной энергии, поступающей к последующему элементу (обычно исполнительному двигателю или усилителю мощности), в соответствии с величиной сигнала, поданного на вход обычно от чувствительного элемента. Необходимость применения усилителей вытекает из того, что мощность, требуемая для создания выходных сигналов в системе, обычно велика, а мощ-

ность управляющего входа мала. Например, в системе ЧПУ станка мощность приводного двигателя составляет несколько тысяч ватт, а входной сигнал от магнитной ленты — сотые и тысячные доли ватта. Поэтому в данном случае в системе задают коэффициент усиления по мощности, равный отношению выходной величины ко входной величине, т. е.

$$K = \frac{P_{сэ}}{P_{чэ}},$$

где $P_{сэ}$ — мощность силового элемента;

$P_{чэ}$ — мощность чувствительного элемента.

Следовательно, основная цепь системы должна усилить сигнал по мощности в тысячи и сотни тысяч раз.

Увеличение коэффициента усиления системы с шаговым приводом (импульсно-шаговая система ЧПУ) благоприятно влияет на уменьшение точностных ошибок почти во всех типовых режимах работы системы. Однако увеличение коэффициента усиления ограничивается устойчивостью системы. При повышении коэффициента усиления система, как правило, приближается к колебательной границе устойчивости. В этом сказываются противоречия между требованиями к точности и требованиями к устойчивости системы. Чтобы не ухудшать динамику системы, усилители должны иметь постоянное усиление для всей области частот следящей системы.

В следящих приводах станков с ЧПУ усиление сигнала управления обеспечивается полупроводниковыми, электромашинными, гидравлическими и механическими усилителями.

При обслуживании реальных схем усилителей систем ЧПУ необходимо иметь четкое представление о влиянии на коэффициент усиления изменения определенных параметров усилителя при замене вышедших из строя элементов или при настройке всей цепи усиления. В качестве примера рассмотрим усилитель мощности системы управления «Контур 4МИ-68», приведенный на рис. 52. Усилитель мощности состоит из двух каскадов усиления (*Т1*; *Т2*) и эмиттерного повторителя (*Т3*; *Т4*), который служит для согласования входной и выходной цепей, (выходная цепь нагружена на обмотку шагового двигателя). Входные цепи на диодах (*Д1*; *Д2*) выполняют логическую операцию «ИЛИ», так как на вход усилителя сигналы поступают с разных триггеров в разное время.

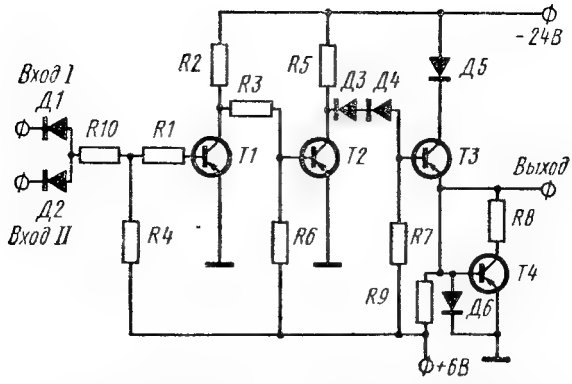


Рис. 52. Схема транзисторного усилителя мощности:
T1 (МП-16), *T2* (П213Б), *T3* (П214Г), Т4 (П216В) — транзисторы; *Д1, Д2* (Д9В), *Д3—Д6* (Д226Д) — диоды; *R1*, *R10* (1,5 кОм), *R2* (1,6 кОм), *R3* (430 Ом), *R4* (4,7 кОм), *R5* (330 Ом), *R6* (1,8 кОм), *R7* (360 Ом), *R8* (0,2 Ом проволочное), *R9* (65 Ом, параллельно два резистора по 130 Ом) — резисторы

Обозначив через K_1, K_2, K_3 коэффициенты усиления отдельных каскадов усилителя и перемножив их, получим коэффициент усиления всего усилителя, так как коэффициент усиления многокаскадного усилителя в относительных единицах равен произведению коэффициентов усиления его каскадов, т. е. $K_{\text{ус}} = K_1 K_2 K_3$.

Второй и третий каскады данного усилителя здесь рассматривать не будем, так как один из них является транзисторным ключом с фиксирующим диодом (*Д3*; *Д4*), а другой — эмиттерным повторителем с коэффициентом усиления, близким к единице.

Первый каскад является усилителем с потенциометрической межкаскадной связью, где компенсация постоянного потенциала, поступающего с выходного электрода предыдущего каскада на вход следующего, осуществляется источником постоянного напряжения +6 В через делители напряжения (потенциометры), состоящие из резисторов *R*1 и *R*4. Коэффициент усиления тока такого каскада можно найти из выражения [47]

$$K = \frac{h_{21э}}{1 + \frac{R_{вх2}}{R6} + \frac{R3 + R_{вх2}}{R2} + \frac{R3 + R_{вх2}}{R2 + R2R6}},$$

где $h_{21э}$ — статический коэффициент по току транзистора *T1*;

$R_{вх2}$ — входное сопротивление второго каскада.

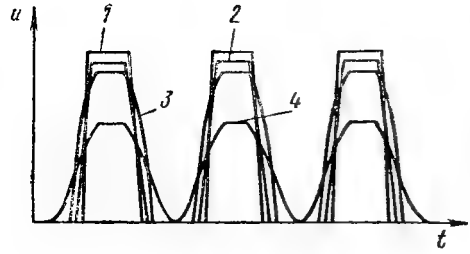


Рис. 53. Изменение амплитуды и формы сигнала в усилителе-ограничителе при изменении коэффициента усиления предыдущего каскада. Коэффициент усиления:

1 — 400; *2* — 300; *3* — 250; *4* — 100

Из рассмотренного выражения видно, что на коэффициент усиления усилителя при его настройке будут влиять параметры транзистора *T1*, величина сопротивления резисторов *R*2, *R*3 и *R*6 и входное сопротивление второго каскада.

При исследовании влияния коэффициента усиления усилителя считывания в системе ЧПУ (см. рис. 20) на работу усилителя-ограничителя влияет изменение коллекторного сопротивления *R*3 в цепи транзистора предыдущего усилителя. Было замечено, что при изменении усиления предыдущего каскада на выходе усилителя-ограничителя изменяется не только амплитуда сигнала, но и форма сигнала. Изменение формы сигнала и особенно переднего фронта оказывает влияние на работу следующего каскада-триггера. Изменение амплитуды и формы усилителя в зависимости от изменения коэффициента усиления предыдущего каскада показано на рис. 53.

На рис. 54, *а* показан гидравлический двухкаскадный усилитель, состоящий из электромеханического преобразователя *1* и управляющего золотника *3* с сервоцилиндром *4*, жидкость в который подается по каналу p, а слив осуществляется по каналу p_0. Усилитель используется

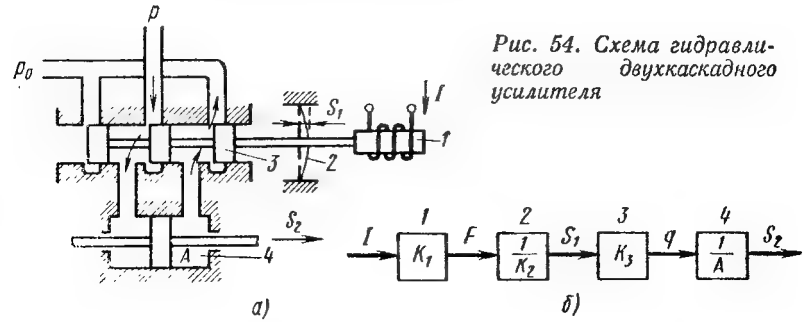


Рис. 54. Схема гидравлического двухкаскадного усилителя

в следящем приводе станка типа ПФП-5 с фазовой системой ЧПУ. Электромагнитная часть электромеханического преобразователя выполняет преобразование тока в тяговое усилие и умножение на постоянную величину (для простоты допускаем, что система преобразования линейна). Следовательно, пренебрегая нелинейностью, можно описать такую систему в динамике простым уравнением (на рис. 54, *б* показана эквивалентная схема)

$$F = K_1 I,$$

где F — сила тяги электромеханического преобразователя;
K_1 — коэффициент, зависящий от конструктивных данных электромагнита;
I — ток в обмотке электромеханического преобразователя.

Уравновешивающая пружина *2* преобразует тяговое усилие в перемещение и умножает выходной сигнал также на постоянную величину. Таким образом, в конечном итоге выходное перемещение электромеханического преобразователя пропорционально входному току, т. е.

$$S_1 = \frac{1}{K_2} F = \frac{K_1}{K_2} I,$$

где K_2 — коэффициент, зависящий от жесткости и конструкции пружины.

Как видно из схемы, к преобразователю присоединен управляющий золотник, который управляет сервоцилиндром. При постоянном давлении жидкости, поступающей в золотник, и незначительной упругости трубопроводов количество жидкости, поступающей в цилиндр, можно считать зависящим только от проходного сечения золотника и не зависящим от статических и инерционных сил, действующих на поршень со стороны связанных с ним движущихся частей. Следовательно, практически можно пренебречь механической инерцией и считать, что данная система не только в статике, но и в динамике описывается уравнением

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{1}{A} q,$$

где S_2 — перемещение сервопоршня;
A — площадь поршня;

q — количество жидкости, проходящей через щель золотника;

$$q = K_3 S_1;$$

здесь K_3 — коэффициент, зависящий от конструкции золотника и рабочей жидкости.

И окончательно уравнение запишется в виде

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{1}{A} K_3 \frac{K_1}{K_2} I = \frac{K_1 K_3}{K_2 A} I; \qquad (2)$$

$$S_2 = \frac{K_1 K_3}{K_2 A} \int I \, dt.$$

Золотник преобразует линейное перемещение в переменный расход, который сервоцилиндром превращается в выходную скорость, так что выходное положение штока сервоцилиндра пропорционально интегралу по времени от тока управления.

В действительности описание процессов в гидроусилителе значительно сложнее, чем следует из выражения (2), однако учет второстепенных факторов приводит к сложным и труднопримени мым выражениям. Поэтому при исследовании гидроусилителя данного типа с поступательным движением как элемента системы ЧПУ целесообразно считать его идеальным интегрирующим звеном. Из выражения (2) видно, что при настройке такой системы необходимо учитывать передаточный коэффициент (коэффициент усиления), зависящий от коэффициентов K_1, K_2, K_3 и площади поршня A [3, 10].

В общем случае при настройке усилителей коэффициент усиления определяется в первую очередь требованиями по точности системы. Изменение коэффициента усиления в рабочих условиях должно быть доведено до возможно меньшей величины, для того чтобы упростить выполнение стабилизации системы ЧПУ.

§ 4. НАСТРОЙКА УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для перемещения управляющих устройств гидравлических исполнительных механизмов электрогидравлических следящих систем станков с ЧПУ используются электромеханические элементы различных видов, служащие для преобразования электрического напряжения постоянного или переменного тока в механическое перемещение, силу

или скорость. Электромеханические управляющие элементы в электрогидравлических, особенно в быстродействующих следящих системах станков с ЧПУ должны развивать максимально возможную силу; гистерезис и зоны нечувствительности должны отсутствовать. Эти требования в системах станков с ЧПУ выполняются при помощи электромеханических преобразователей (ЭМП), построенных на электромагнитном принципе. Принцип действия преобразователя рассмотрен в гл. II.

Напишем уравнение сил электромагнитного преобразователя с поступательным движением якоря при действии на якорь нагрузки

$$F_{эм} = P_п + F_н, \tag{3}$$

где $F_{эм}$ — сила, развиваемая электромагнитом;
$P_п$ — сила пружин подвески;
$F_н$ — сила нагрузки.

Очевидно, для того чтобы судить о влиянии настроек и регулировок на внешнюю и тяговую характеристики электромагнитного управляющего элемента как звена в цепи управления, необходимо определить внешнюю статическую характеристику электромеханического преобразователя. Для этого необходимо рассмотреть характер сил, действующих на якорь при поступлении управляющего сигнала в обмотки управляющего элемента; взаимодействие их рассмотрено в работе [10].

В дифференциальной схеме включения обмоток предусмотрено наличие управляющего сигнала в виде разности $\Delta i = i_2 - i_1$ токов в катушке. При отсутствии управляющего сигнала начальные токи, протекающие в катушках, равны друг другу ($i_1 = i_2$). Величина сигнала управления принимает максимальное значение в том случае, когда ток в одной из катушек упадет до нуля, а в другой возрастет до максимального значения $i_m = 2i_1\ (2i_2)$, и тогда $\Delta i_m = 2i_1\ (2i_2)$.

При разбалансе токов в катушках электромеханического преобразователя на его якорь со стороны каждого полюсного наконечника действуют противоположно направленные силы F_1 и F_2, которые могут быть представлены в виде [10]

$$F_1 = \frac{(i_1 w)^2}{2} \cdot \frac{dG_1}{dS};\ F_2 = \frac{(i_2 w)^2}{2} \cdot \frac{dG_2}{dS}, \tag{4}$$

где i_1 и i_2 — соответственно токи в первой и во второй катушках электромагнита;

w — число витков в каждой катушке;

G_1 и G_2 — магнитные проводимости рабочих зазоров соответственно под первым и вторым полюсными наконечниками;

S — перемещение якоря.

На якорь будет действовать результирующая сила

$$F_{эм} = F_1 + F_2. \tag{5}$$

Эта сила вызывает смещение якоря из среднего положения, изменяя геометрию рабочих зазоров и величины их магнитных проводимостей по ходу якоря.

Поскольку концы якоря, входящие в полюсные наконечники магнитопровода, имеют форму усеченного конуса, то проводимость рабочих зазоров выражается зависимостью

$$G_к = \frac{2\pi\mu r_{кс}}{\delta_к \cos\alpha}\left(\frac{m}{\sin\alpha} - \delta_к \cos\alpha\right), \tag{6}$$

где μ — магнитная проницаемость воздуха;

m — высота конической части якоря;

α — угол конусности концов якоря;

$r_{кс}$ — радиус конической части якоря в плоскости среза полюсного наконечника (в плоскости торца якоря);

$\delta_к$ — текущее значение рабочего зазора;

$к$ — номер полюсного наконечника (1 или 2).

Рассматривая зависимости (3), (4) и (5), (6), можно сделать заключение, что на тяговую характеристику электромеханического преобразователя, разработанного и эксплуатируемого в станках с ЧПУ, будут влиять как параметр настройки только первоначальные токи в обмотках преобразователя i_1 и i_2, так как остальные параметры постоянны для эксплуатируемого электромеханического преобразователя.

На рис. 55 приведены статические характеристики электромеханического преобразователя в зависимости от изменения жесткости пружин подвески. По оси ординат показано изменение величины перемещения сердечника ЭМП, по оси абсцисс — токи в катушках ЭМП.

Увеличение жесткости пружин, которое возможно при настройке электромеханического преобразователя при небольших ходах, нарушает линейность и угол наклона

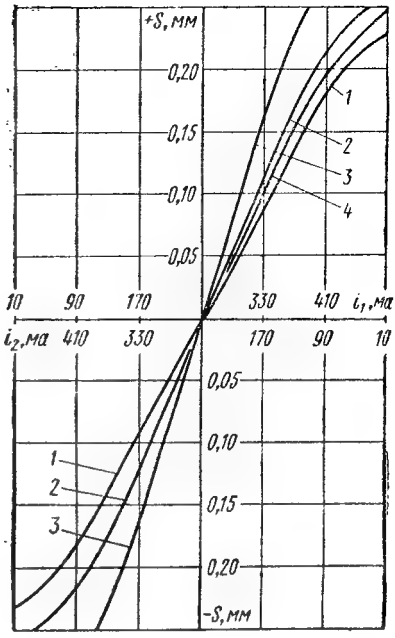


Рис. 55. Статическая характеристика электромеханического преобразователя:

1 — при увеличении натяга пружины на 0,15 мм с обеих сторон преобразователя; *2* — при правильной настройке; *3* — при поломке пружины с одной стороны; *4* — при увеличении натяга пружины на 0,07 мм (указана одна половина кривой)

внешней характеристики, что нежелательно. Поэтому для сохранения линейности внешней характеристики при данной конструкции электромеханического преобразователя следует очень внимательно подходить к регулировке и настройке, учитывать все факторы, влияющие на характеристику преобразователя.

Все предыдущие рассуждения были рассмотрены при условии, что сила нагрузки $F_н$ электромеханического преобразователя постоянна. Нередки случаи, когда эта сила является одной из причин низкого качества следящей системы станка, ее нестабильности и малой надежности.

Перемещению золотника в осевом направлении препятствует ряд сил, которые необходимо преодолеть электромеханическому преобразователю, управляющему этим золотником. К ним относятся силы сухого трения, силы вязкого трения, силы облитерации, силы инерции и осевые гидродинамические силы. Силы инерции и силы трения могут быть рассчитаны и определены экспериментально, но они имеют сравнительно небольшое значение в общем балансе сил, действующих на золотник. Большое влияние в ряде случаев оказывают облитерационные силы, но они не поддаются расчету, нестабильны и их величина может быть определена лишь ориентировочно. Кроме того, наложение осцилляции снимает облитерационные силы. Поэтому наибольший интерес представляет оценка гидродинамических сил, создаваемых струей жидкости, протекающей через рабочие окна золотниковой пары.

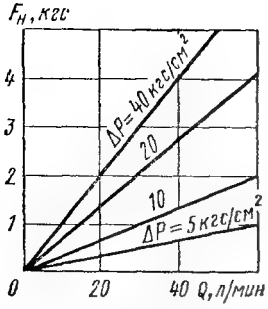


Рис. 56. Расчетные кривые изменения гидродинамической силы $F_н$, действующей на золотник (Δp в кгс/см²)

Приближенно, но с достаточной точностью для практических целей осевую силу можно определить по уравнению [3]

$$F_н \approx 1{,}32 \frac{\gamma}{q} \cdot \frac{Q^2}{\pi dS}, \qquad (7)$$

где γ — удельный вес рабочей жидкости в кгс/см²;
Q — расход через проходное сечение золотника в л/мин;
d — диаметр плунжера золотника в мм;
S — перемещение золотника в мм;
q — гравитационное ускорение в см/с².

Расход через окна золотника можно определить из соотношения [10]

$$Q = \mu f \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}, \qquad (8)$$

где μ — коэффициент расхода;
f — площадь проходного сечения окна золотника в мм²;
Δp — перепад давления на кромке золотника, который при расчете проходного сечения принимают равным 2% от рабочего давления;
ρ — плотность рабочей жидкости.

Анализируя соотношения (7) и (8), характеризующие гидродинамические силы, можно определить, что основными параметрами, влияющими на настройку золотника, являются параметры рабочей жидкости, геометрические размеры рабочей щели золотника, рабочий ход золотника, величина давления в линии нагнетания. Последнее подтверждается экспериментальными данными [46].

На рис. 56 показаны графики изменения гидродинамической силы в зависимости от перепада давления в проходной щели золотника Δp и расхода жидкости Q. Гидродинамическая сила, действующая на плунжер золотника, состоит из переменной и установившейся составляющих сил. Установившаяся сила по своей абсолютной величине значительно больше переменной составляющей силы. Она и принимается во внимание при настройке и регулировке

золотников и зависит от перепада давления в проходной щели золотника, величины перемещения золотника и расхода жидкости.

Для уменьшения гидродинамической силы и силы трения на плунжер золотника иногда накладывают принудительное незначительное колебание вблизи нулевого перекрытия рабочих щелей золотника (осцилляцию). Наличие гидродинамической силы и осцилляции может вызвать дополнительные силы, стремящиеся открыть золотник и привести к нежелательным автоколебаниям в системе управления.

§ 5. НАСТРОЙКА ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ ГИДРОСИСТЕМЫ СТАНКОВ

Известное в теории регулирования противоречие между устойчивостью и точностью систем автоматического управления приводит к необходимости оптимальной настройки, когда можно получить точность в несколько раз большую, чем при обычной настройке, при незначительном уменьшении запаса устойчивости.

Для управления движениями рабочей жидкости в гидросистемах станков с ЧПУ применяют различную аппаратуру для ограничения давления насоса и потребляемой мощности, защиты гидросистемы от перегрузок и регулирования давления в любом месте гидросистемы станка.

К аппаратуре защиты относятся предохранительные клапаны, ограничивающие повышение давления в системе сверх заданного путем периодического и однократного отвода (стравливания) жидкости в бак. Если клапан не срабатывает, его затвор должен герметически закрывать входное отверстие.

К аппаратуре регулирования относятся обратные клапаны, предназначенные для пропуска жидкости в том направлении, в котором затвор клапана открывается под действием давления жидкости. Если давление жидкости уменьшается, затвор клапана под действием его веса или силы пружины опускается и перекрывает входное отверстие. Обратный клапан — пассивное сопротивление потоку рабочей жидкости, и поэтому оно должно быть минимальным, определяемым формой затвора клапана и площадью его прохода. Клапан с конусным затвором оказывает меньшее сопротивление потоку жидкости, чем, например, плоский или шаровой. Опорная поверхность

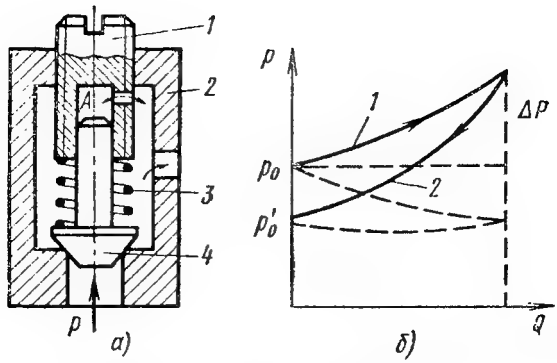


Рис. 57. Предохранительный клапан:
а—эскиз клапана; б—расходно-напорная характеристика

седла шарового клапана — кромочная, она легко деформируется. Поэтому первоначальная форма сопряжения меняется, и в результате уменьшается герметичность клапана.

Одна из возможных схем предохранительных клапанов приведена на рис. 57, *а*. С помощью пружины *3* конусный клапан *4* прижимается к седлу в корпусе *2*. Натяг пружины *3*, определяющий величину давления, при котором срабатывает клапан, регулируется с помощью винта *1*. Хвостовик клапана входит в отверстие этого винта, образуя полость *A*, объем которой изменяется при изменении положения клапана *4*. Полость *A* соединена с внутренней полостью клапана с помощью калиброванного отверстия и служит для демпфирования, т. е. для предотвращения резонансных колебаний клапана. Эффект демпфирования основан на возникновении на клапане отрицательной силы, пропорциональной скорости перемещения клапана, которая уменьшает эту скорость.

Предохранительный клапан должен быть надежным в работе, иметь требуемую (чаще всего пологую) расходно-напорную характеристику, быть динамически устойчивым (на расчетном режиме) и обладать наименьшим гистерезисом.

Требование пологости расходно-напорной характеристики клапана состоит в том, что если клапан отрегулирован на давление p_0, при достижении в напорной магистрали этой величины давления клапан откроется и рабочая жидкость начнет поступать через клапан в область

низкого давления. Течение жидкости через клапан приводит к некоторому превышению давления Δp сверх давления p_0, при котором клапан открылся. Следовательно, характеристика клапана, т. е. кривая $p = f(Q)$, является возрастающей; это значит, что с увеличением расхода жидкости перепад давления в клапане возрастает (кривая *1*, рис. 57, *б*). Значительное увеличение перепада давления, а значит и увеличение давления под клапаном в процессе перепуска, отрицательно сказывается на работе клапана. Очевидно, возможен и другой случай, когда перепад давления уменьшается с ростом расхода (кривая *2*, рис. 57, *б*). Наилучшим клапаном является тот, который настроен на горизонтальную характеристику.

Требование динамической устойчивости клапана означает, что в нем не должны возникать незатухающие колебательные процессы на всем диапазоне расходов через него. Клапан представляет собой динамическую систему, связанную с упругой средой — жидкостью. В такой системе при определенных условиях может возникнуть автоколебательный процесс. Такое явление нежелательно в работе клапана, так как появившиеся автоколебания в клапане приведут к возникновению колебательного процесса во всей гидросистеме станка. Автоколебания в клапане могут возникнуть из-за наличия скачков давления в системе, механических колебаний самого клапана, наличия гистерезиса в клапане, поломки пружин и т. п.

Требование наименьшего гистерезиса означает, что клапан должен быть так настроен, чтобы разница между давлением p_0 его полного открытия и давлением p_0' полного закрытия была возможно меньшей. Гистерезис объясняется трением в элементах клапана и появлением остаточной деформации пружины.

Динамические характеристики клапана можно получить только экспериментально. Они показывают способность клапана регулировать расход, давление и характеризуют одновременно качество регулирования.

На рис. 58, *а* приведена упрощенная конструкция обратного клапана, предназначенного для пропускания потока рабочей жидкости только в одном направлении и остановки этого потока в случае его движения в обратном направлении. Обратный клапан состоит из регулирующего элемента (шарика) *3*, поджатого пружиной *2* в седле, которое расположено в корпусе *1*. Герметичность такого клапана при закрытом затворе зависит от сопря-

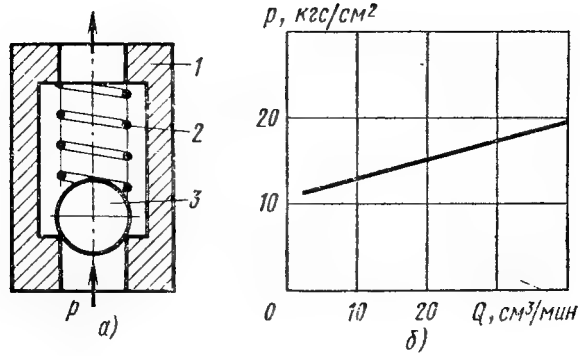


Рис. 58. Обратный клапан:
а — эскиз клапана; б — статическая характеристика

жения рабочих частей затвора и седла. Наилучшую герметичность такого обратного клапана можно получить при сопряжении сферы и конуса.

На статическую характеристику обратного клапана влияет правильный выбор конструкции пружины клапана, т. е. ее размеров, предварительного натяжения, диаметра проволоки, жесткости. Проволока для пружин клапанов должна удовлетворять динамической и статической прочности и стабильно сохранять свои упругие свойства, обладая в то же время пластичностью.

Статическая характеристика Δ_c обратного клапана — это отношение прироста давления на единицу прироста расхода, она показывает характер изменения расхода Q от давления p. При линейной характеристике клапана соблюдается пропорциональность между расходом и давлением.

На рис. 58, *б* показана характеристика обратного клапана с конусным затвором при небольшом начальном давлении ($p_0 = 10$ кгс/см²). На рисунке характеристика линейная, поэтому коэффициент расхода постоянен и не зависит от расхода и формы проходного сечения. При больших давлениях статическая характеристика нелинейная: сказывается изменение формы проходного сечения клапана на изменение коэффициента расхода. Обычно при небольших начальных давлениях статическая характеристика для клапанов $\Delta_c = 0{,}17 \div 0{,}25$ кгс·мин/см²·л.

Динамическая устойчивость гидроприводов подач станков с ЧПУ зависит в основном от статических и ди-

намических характеристик применяемых в гидросистеме узлов и элементов. Оказывает также влияние, хотя и в меньшей степени, монтаж узлов и элементов, их расположение в напорной магистрали и способ присоединения трубопровода к узлам и элементам.

Одноступенчатые предохранительные клапаны, т. е. клапаны с одной дросселирующей щелью имеют возрастающую статическую характеристику. Таким образом, получение постоянного давления при переменном расходе в клапанах такого типа практически невозможно. Пологую линейную характеристику клапана можно получить, если его конструкция будет выполнена в виде двухступенчатого клапана или клапана с серводействием. Принцип действия такого клапана основан на том, что выравнивание давления под клапаном при переменном расходе достигается увеличением давления жидкости на клапан по мере его подъема. Отечественной промышленностью разработаны и выпускаются серийно клапаны такой конструкции, например клапаны типа БГ52-1, МН5781, КПГ, ПА-474 и др. [9]. В зарубежном станкостроении применяют клапаны с горизонтальной статической характеристикой, которые выпускаются фирмами «Викерс», «Бош», «Пауль Лайстриц» [3, 9].

В гидропередачах станков с ЧПУ в качестве рабочей жидкости применяют минеральные масла марки АУ (ГОСТ 21642—50) и АМГ (ТУ МНП-457—53). Критерием при оценке рабочей жидкости в гидропередаче являются такие параметры, как смазывающая способность, воспламеняемость, сжимаемость, вязкость, малая склонность к вспениванию, большой срок службы, устойчивость против нагрева, проникновения воды, окисления и деформации сдвига, малая способность растворения воздуха.

Рассмотрим наиболее важные из них.

Сжимаемостью называется свойство жидкости изменять свой первоначальный объем при изменении давления. Для масел, используемых в гидросистемах станков с ЧПУ, относительное изменение объема жидкости при давлении от 0 до 100 кгс/см^2 может примерно изменяться от 0 до 0,8%, величина изменения зависит от температуры и наличия в ней воздуха. В ряде случаев такими изменениями можно пренебречь, если сжимаемость не определяет качества работы гидропривода. Но в быстродействующих гидравлических приводах подач станков с ЧПУ

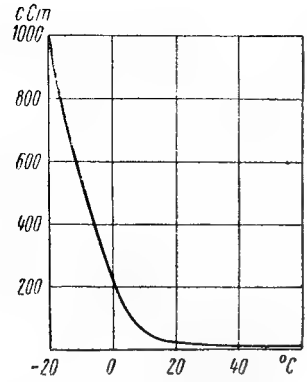


Рис. 59. График зависимости вязкости масла АУ от температуры

из-за изменения этого свойства жидкости ухудшается динамическая характеристика станка.

Вязкость жидкости, т. е. способность ее слоев (частиц) сопротивляться скольжению или сдвигу, зависит от различных факторов. Здесь будет рассмотрено только влияние на вязкость изменения температуры рабочей жидкости. С повышением температуры вязкость капиллярных жидкостей и их смесей понижается [3].

Кривая зависимости вязкости от температуры для масла типа АУ приведена на рис. 59. Из графика видно, что с увеличением температуры вязкость уменьшается, причем эта зависимость носит нелинейный характер. Очевидно, чем меньше изменяется вязкость с изменением температуры, тем выше качество и лучше эксплуатационные свойства рабочей жидкости. При применении жидкостей, имеющих крутую кривую температурной зависимости вязкости, затрудняется работа гидросистем при температуре ниже 10° С. Последнее объясняется в основном тем, что при повышении вязкости масла ухудшается ее прокачиваемость в элементах гидросистемы.

Явление заращивания капиллярных щелей наблюдается при протекании даже тщательно очищенных жидкостей, так как процесс облитерации представляет собой адсорбцию поляризованных молекул на стенках щели. Толщина этого слоя может достигать 10 мкм и более. Если номинальный зазор щели золотника или клапана равен сумме толщин адсорбированных слоев или будет меньше ее, то может произойти полное заращивание капиллярной щели. Граничные слои адсорбированных молекул имеют свойства, отличные от свойств рабочей жидкости. В частности, облитерационный слой обладает определенной твердостью. Интенсивность заращивания капиллярной щели зависит от величины перепада давления на ней. С увеличением перепада давления облитерация уменьшается. Влияет на скорость облитерации и температура жидкости, с увеличением которой растет интенсивность облитерации. Там, где облитерация отри-

цательно влияет на работу гидроагрегатов, необходимо, чтобы сопрягаемые поверхности деталей гидроагрегатов двигались относительно друг друга, так как движение разрушает слой поляризованных молекул.

Кавитационные режимы в гидроагрегатах, в том числе насосах, создают особо тяжелые условия работы и, как правило, приводят к преждевременному износу и выходу из строя гидроагрегатов. Явление кавитации жидкости заключается в образовании разрывов сплошности (каверн) в тех участках потока жидкости, где в результате различных причин, обусловленных движением жидкости, происходит значительное понижение давления. Наблюдаемые в практике кавитационные явления происходят вследствие выделения из жидкости растворенного воздуха и расширения его пузырьков, находящихся в механической связи с рабочей жидкостью. В общем случае явление кавитации связано с уменьшением давления на входе в насос до величины, при которой происходит выделение растворенного в рабочей жидкости воздуха. На процесс кавитации влияет температура жидкости и изменение числа оборотов насоса.

В настоящее время нет строго обоснованного объяснения механизма возникновения кавитационного разрушения. Однако последние исследования позволяют заключить, что эти явления происходят в основном в результате механического действия на элементы гидроагрегатов гидравлических ударов при смыкании воздушных кавитационных каверн, а также в результате действия на поверхности развивающихся при этом высоких температур.

Поверхности металлических частей и деталей гидроагрегатов, подверженных кавитационному разрушению, имеют характерные признаки в виде выбоин канавообразной, круглой и других форм.

Размер и характер разрушений поверхности определяется интенсивностью кавитационного процесса и влиянием таких факторов, как кавитационная стойкость материала деталей, загрязнение и температура самой жидкости [3, 21].

§ 6. УСТАНОВКА И РЕГУЛИРОВКА ДАТЧИКОВ СТАНКОВ С ЧПУ

В станках с ЧПУ моделей ФП-9М, ФП-7М, ФП-17М и ПФП-5 имеется механизм отсчета координат рабочих органов станка. Механизм состоит из сельсинов, вклю-

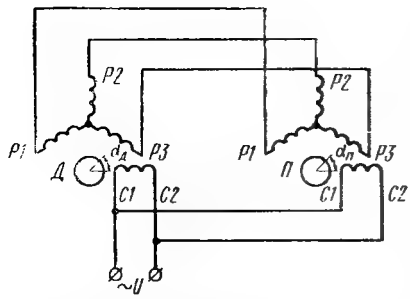


Рис. 60. Схема включения сельсина в индикаторном режиме

ченных в индикаторном режиме, и механизма отсчета с циферблатами отсчета линейных величин. В качестве датчика, определяющего положение рабочих органов станка, применен сельсин типа БД-404А. В качестве привода механизма отсчета тоже применен сельсин типа БД-404А. Сельсин представляет собой миниатюрную электрическую машину, в обычном исполнении сходную с синхронным генератором. Ротор сельсина имеет одну обмотку, а статор три обмотки, оси которых сдвинуты на 120° одна относительно другой.

Сельсины в механизме отсчета используются в индикаторном режиме, они работают в паре: сельсин-датчик Д, связанный с выходным валом привода рабочего органа станка, и сельсин-приемник П, связанный с входным валом механизма отсчета. На рис. 60 изображена схема включения сельсинов в индикаторном режиме. Роторы обеих сельсинов получают питание от одного источника переменного тока u, статорные обмотки соединены между собой, как показано на рисунке. При одинаковом положении валов токи в соединительных проводах отсутствуют. Если входной вал сельсина-датчика повернуть на некоторый угол, то в соединительных проводах появятся токи и вызовут у приемника момент, стремящийся свести угол рассогласования $\Delta\alpha = \alpha_Д - \alpha_П$ к нулю.

При непрерывном вращении ротора датчика ротор приемника будет также вращаться с одинаковой скоростью и одинаковым мгновенным угловым положением, т. е. будет следить за положением ротора сельсина-датчика.

Одной из основных проблем при наладке индикаторных сельсиновых передач является установка нулевого положения сельсинов.

Сельсины имеют фиксированное начало отсчета, которым является электрический нуль. От того как настроен электрический нуль такой передачи, зависит точность отсчета. Для настройки нулевого положения сельсинов командный вал устанавливается в такое положение, при

котором нули мерительных линеек совпадают с нулями нониусов. Нулевым положением рабочих органов, например, станка ФП-17М является: стол — среднее положение, ползун — крайнее заднее положение, головка — крайнее верхнее положение. Ось фрезерной головки должна совпадать с осью технологической втулки ∅ 20А, расположенной в столе (допустимый эксцентриситет при повороте шпинделя с установленным на нем индикатором — не более 0,02 мм), а расстояние от рабочей поверхности стола до торца шпинделя должно быть 350 ± ± 0,02 мм. Когда это обеспечено, у сельсина-датчика можно установить электрический нуль вращением корпуса сельсина в его монтажном отверстии. Электрический нуль будет иметь место, когда при приложении надлежащего напряжения на *C1C2* напряжение на *P1P3* будет равно нулю. Но напряжение на *P1P3* будет также равно нулю, когда сельсин повернется на 180° от положения электрического нуля.

Имеется несколько способов распознавания, является ли это положение электрическим нулем или сдвинуто относительно него на 180°. Рассмотрим один из этих способов.

Если смотреть вдоль вала ротора спереди датчика и повернуть вал ротора по часовой стрелке на малый угол, то при совпадении фазы появившегося напряжения на *P1P3* с фазой напряжения на *C1C2* сельсин будет около электрического нуля. Фаза может быть определена с помощью осциллографа по фигурам Лиссажу или с помощью специального фазометра.

На точность индикаторного режима работы сельсинной передачи оказывают влияние следующие факторы: величина моментов трения и нагрузки приемника, конструктивные и электрические параметры сельсинов и параметры и точность настройки.

Обычно эта погрешность определяется экспериментально в виде полусуммы абсолютных значений максимальных ошибок, полученных для двух направлений вращения датчика в пределах одного оборота. Так, например, при максимальных ошибках $+\Delta\alpha_1$ для одного направления вращения и $-\Delta\alpha_2$ для противоположного максимально возможная погрешность для сельсина определится из выражения

$$\Delta\alpha = \pm \frac{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}{2}.$$

В фазовых системах ЧПУ для контроля и регулирования скорости движения рабочих органов в качестве датчиков обратной связи по скорости применяют тахогенераторы, которые выполняют роль воспринимающего элемента следящей системы. Работа тахогенератора описывается уравнением дифференцирующего звена, и, следовательно, тахогенератор выполняет в системах ЧПУ роль корректирующего устройства.

Погрешность тахогенераторов постоянного тока зависит от температуры (изменяется сопротивление обмоток и магнитная проницаемость стали) и нестабильности щеточного контакта.

Для многих следящих систем эта погрешность не является серьезным недостатком, но становится таковым, если в системе будет режим, при котором вращение происходит с малой скоростью. Подпрыгивание щеток из-за наличия коллектора при малых скоростях вращения создает дополнительные ложные изменения напряжения, снимаемого с тахогенератора. Поэтому при регулировании щеточных механизмов необходимо особое внимание уделять равномерности усилия прижатия и прилегания щеток.

Подобно любому электромеханическому устройству, используемому в системах ЧПУ, тахогенераторы должны иметь точные и концентричные валы и установочные монтажные поверхности, так как при нарушении этих условий наступает преждевременный износ подшипников и даже поломка вала.

В качестве датчиков обратной связи по положению в замкнутых системах ЧПУ фазового типа применяются вращающиеся трансформаторы и редусины. При установке и регулировке этих датчиков к ним предъявляются те же требования, что и к сельсинной передаче или тахогенераторам. Регулировка нулевого положения осуществляется, как для сельсинной передачи, в трансформаторном режиме [19, 30, 44].

§ 7. НАСТРОЙКА ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ ЦЕПЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ЧПУ

В качестве элементов обратной связи по положению в фазовых системах ЧПУ, которые осуществляют преобразование фактического положения управляемого элемента в фазу переменного напряжения, используются электромеханические фазовращатели. В станках типа

ФП-7, ФП-17, ПФП-5, 6М13-ГН1 и др. в качестве фазовращателей используются стандартные вращающиеся трансформаторы типа ВТМ-1В и редусины типа Р-15 или Р-64.

Принципиальная схема включения вращающегося трансформатора в фазовращательный режим с расщеплением магнитного поля рассмотрена в гл. II, § 9. Напряжение питания подводится к роторной обмотке, а выходное напряжение снимается со средней точки RC-цепочки, включенной между статорными обмотками. Для правильной работы схемы фазовращателя необходимо, чтобы выполнялось условие $\omega RC = 1$. Параметры цепочки найдем следующим образом [19]. Пусть индуктивность обмотки вращающегося трансформатора равна L, а ее активное сопротивление (с учетом потерь) равно R_L. Тогда ток в этой обмотке

$$I_1 = \frac{u_0}{R_L + j\omega L}, \tag{9}$$

где ω — частота сигнала;

u_0 — напряжение на обмотке вращающегося трансформатора;

j — комплексная величина.

Ток во второй обмотке с включенной цепочкой

$$I_2 = \frac{u_0}{(R + R_L) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \tag{10}$$

Приравнивая амплитуды токов и их фазы с учетом, что между ними должен быть сдвиг 90°, получим систему из двух уравнений

$$\left.\begin{aligned} R_L^2 + \omega^2 L^2 &= (R + R_L)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2; \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right) + \operatorname{arctg}&\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R + R_L}\right) = \frac{\pi}{2}. \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Решая эту систему, получим

$$R = \omega L - R_L \quad \text{и} \quad C = \frac{1}{\omega(\omega L - R_L)}. \tag{12}$$

Как следует из приведенного ранее анализа, схема питания вращающегося трансформатора по принципу расщепления магнитного поля вносит фазовую ошибку при вращении ротора. Количественно эта ошибка будет

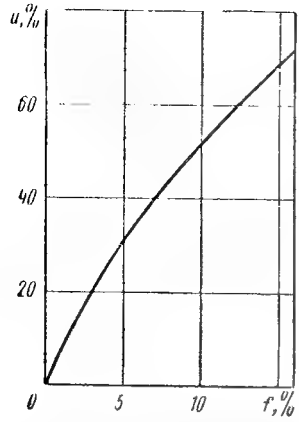


Рис. 61. График вависимости изменения амплитуды напряжения от изменения частоты

тем больше, чем выше скорость вращения трансформатора, и в некоторых случаях может явиться причиной существенных фазовых искажений. При использовании данной схемы возникают также фазовые и амплитудные ошибки при отклонении частоты питающего напряжения от номинального значения. Колебания частоты могут возникать из-за детонации магнитной ленты при протягивании ее через лентопротяжный механизм. Еще более существенная ошибка появится, если запись программ производится на разных интерполяторах со своими фазовыми преобразователями и лентопротяжными механизмами. Это приводит к тому, что цепочку RC вращающегося трансформатора необходимо подстраивать каждый раз, как сменится интерполятор, так как скорость магнитной ленты у разных записывающих устройств практически будет разной, и эта разность может составлять 2—3% и более.

Экспериментальная величина изменения амплитуды напряжения в схеме с расщеплением магнитного поля вращающегося трансформатора в зависимости от отклонения частоты питающего напряжения от номинала при постоянных значениях R и C, и считая L и R_L тоже постоянными, приведена на рис. 61. При настройке цепочки RC фазорасщепителя необходимо учитывать этот фактор.

Из рассмотренных выражений (9), (10) и (11), (12) видно, что на настройку фазовращателя влияют два параметра — величины емкости и сопротивления; от того, как они подобраны, будет зависеть правильная работа фазовращателя. На рис. 62 показаны зависимости изменения напряжения на выходе фазовращателя при различных отклонениях емкости и сопротивления от номинальных значений.

По принципу действия фазовые системы ЧПУ относятся к двухканальным системам. Двухканальными системами называют такие системы, информация в которых передается по двум каналам и сигнал управления выра-

батывается на основе анализа сообщений как первого, так и второго каналов. Поэтому любые фазовые или амплитудные искажения, вносимые системой управления, скажутся на устойчивости работы системы.

Одним из источников фазовых погрешностей являются цепи связи (емкости) в усилителях переменного тока, которые предназначены для передачи переменной составляющей тока (напряжения) с минимальными потерями и разделения постоянной и переменной составляющих тока (напряжения).

Реостатно-емкостная связь состоит из активных и емкостных сопротивлений (см. схемы на рис. 19 и 64). Поэтому частотно-зависимыми элементами в транзисторных схемах будут конденсаторы связи и собственно транзистор. Частотные свойства транзистора зависят от носителей тока, диффундирующих от эмиттера к коллектору, которые движутся сравнительно медленно и достигают его неодновременно. Поэтому по мере изменения частоты ток коллектора при заданном токе эмиттера изменяется по амплитуде и фазе. В первом приближении можно считать транзистор частотно-зависимым элементом с постоянной времени τ_α при включении по схеме с общей базой и τ_β при включении по схеме с общим эмиттером. Более подробно эти вопросы рассмотрены в литературе [22, 34].

При анализе цепей связи все элементы схемы рассматриваются только по отношению к переменным составляющим напряжения (тока), постоянные составляющие из рассмотрения исключаются, так как

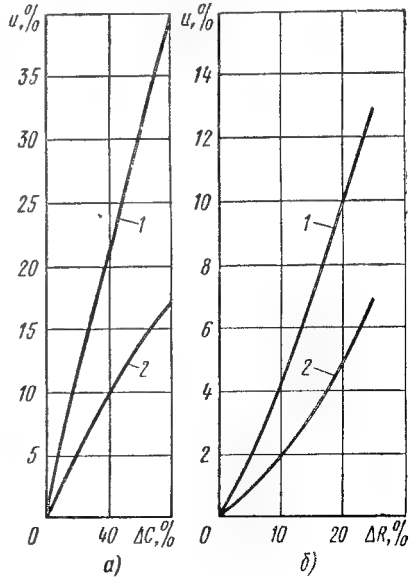


Рис. 62. Изменение напряжения на выходе фазовращателя:

а — при отклонении емкости от номинала; *1* — при изменении $C_{ном} - \Delta C$; *2* — при изменении $C_{ном} + \Delta C$; *б* — при отклонении сопротивления от номинала; *1* — при изменении $R_{ном} - \Delta R$; *2* — при изменении $R_{ном} + \Delta R$

предполагается, что их величины выбраны и обеспечивают работоспособность каждого каскада усилителей системы управления станком с ЧПУ.

Условием, что сдвиг фаз, вносимый цепью связи, равен нулю, является выражение

$$\frac{1}{\omega\tau_н} = \omega\tau_в, \qquad (13)$$

где $\tau_н$ — постоянная времени цепи в области низких частот, зависящая от емкости цепи связи и сопротивления нагрузки;

$\tau_в$ — постоянная времени цепи связи в области высших частот, зависящая от емкости, параллельно подключенной сопротивлению, и сопротивления нагрузки каскада;

ω — частота передаваемого сигнала.

Из выражения (13) следует, что при настройке частотно-зависимых цепей усилителей необходимо давать оценку при подборе элементов цепей связи каскадов усилителей как для фазовых, так и для импульсных систем ЧПУ.

Принципиальная схема реостатно-емкостной связи транзисторного усилителя и вид фазово-частотной характеристики цепи связи показаны на рис. 63. Цепь E_c и R_c представляет источник сигналов с внутренним сопротивлением R_c.

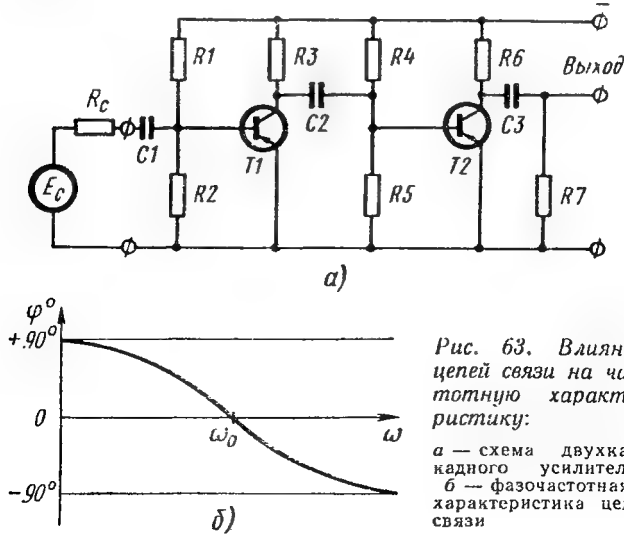


Рис. 63. Влияние цепей связи на частотную характеристику:

а — схема двухкаскадного усилителя; *б* — фазочастотная характеристика цепи связи

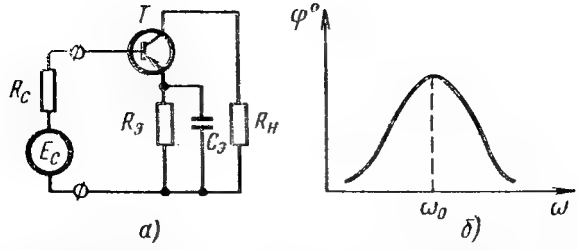


Рис. 64. Влияние эмиттерных цепей усилителя на частотную характеристику:

а — схема каскада; б — фазовая характеристика

В некоторых схемах цепей смещения для стабилизации коллекторного тока используется отрицательная обратная связь по току, создаваемая включением сопротивления $R_э$ в цепь эмиттера. При этом уменьшается коэффициент усиления каскада по напряжению и увеличиваются его входное и выходное сопротивления.

Схема для определения влияния емкости в цепь эмиттера на частотные свойства каскада показана на рис. 64. Сопротивление в цепи эмиттера $R_э$ обычно блокируется конденсатором $C_э$, чтобы уменьшить полное сопротивление в цепи эмиттера для переменной составляющей тока.

В практических схемах транзисторных каскадов угол сдвига фаз, вносимый цепью эмиттера с постоянной времени $\tau_э = C_э R_э$, определяется из выражения

$$\operatorname{tg}(\varphi) \approx \frac{1}{\omega R_{вх.\,б} C_э} = \frac{\beta}{\omega R_{вх.\,э} C_э} \qquad (14)$$

при условии, что выполняется зависимость

$$\frac{1}{\omega C_э} \ll R_{вх.\,б} R_э,$$

где ω — частота сигнала;

$R_{вх.\,б}$ — входное сопротивление каскада с общей базой;

$R_{вх.\,э}$ — входное сопротивление каскада с общим эмиттером;

$C_э$ — емкость в цепи эмиттера;

$R_э$ — сопротивление в цепи эмиттера;

β — коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером.

По выражению (14) можно судить, что на фазовую характеристику каскада с конденсатором в цепи эмиттера при настройке этих цепей будут влиять емкость $C_э$ и входное сопротивление каскада. Примерная частотная зависимость для этой цепи изображена на рис. 64, *б*.

При изготовлении усилителей переменного тока и их настройке в фазовых следящих системах ЧПУ наиболее важен анализ цепей настройки в области низких частот, так как эти усилители предназначены для работы на частоте 250 Гц, при отклонениях от этой частоты не более чем на десятки герц.

§ 8. ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ В СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧАХ И ДАТЧИКАХ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ СТАНКА С ЧПУ

При эксплуатации станков с ЧПУ происходит постепенное ухудшение их качественных показателей. Одной из причин ухудшения качества и точности работы станка является появление мертвого хода в кинематических цепях. Мертвый ход (люфт) в механических передачах станков с ЧПУ вызывается зазорами в винтовых передачах, зубчатых зацеплениях, муфтах и т. п., которые появляются в результате износа или разрегулировок. Количественно мертвый ход представляет собой угол поворота ведущего звена, в пределах которого при реверсе ведомое звено остается неподвижным.

Определение люфта в механических цепях станков с ЧПУ необходимо для выявления наибольших ошибок и определения максимальных суммарных погрешностей при обработке деталей. Результаты определения суммарного зазора в кинематической цепи используются и при анализе работы следящей системы станка с ЧПУ. Мертвый ход, пересчитанный на угол поворота ведущего звена кинематической цепи, является одним из критериев качества работы следящей системы. Существует расчетный метод определения мертвого хода. Сравнивая зазор, полученный расчетным методом, и величину реального зазора и зная допустимые отклонения этих величин, можно судить о качестве механической передачи.

Расчет мертвых ходов производится по всем кинематическим цепям, соединяющим источник движения с рабочим органом станка. Для облегчения расчета рекомендуется заранее определить цены оборотов всех валиков (величину перемещения исполнительного узла при одном

обороте ведущего вала) и рассчитать мертвый ход для всех отдельных передач, составляющих кинематическую цепь системы станка.

Мертвый ход цилиндрической или конической зубчатых передач можно определить по формуле

$$\delta = k_1 \frac{A_1}{mz_1} = k_1 \frac{A_2}{mz_2},$$

где A_1 и A_2 — цена оборота вала (величина перемещения исполнительного узла при одном обороте данного вала) в мм;

z_1 и z_2 — число зубьев ведомого и ведущего колес;

m — модуль зубчатого зацепления;

k_1 — коэффициент, зависящий от степени точности изготовления колес и их конструкции.

Для реечной передачи зазор

$$\delta = k_1 \frac{A}{mz},$$

где A — цена оборота валика в мм;

z — число зубьев реечного колеса;

k_1 — коэффициент, зависящий от точности изготовления зубьев рейки.

Для винтовой передачи (винт—гайка), предусматривающей выборку зазора, мертвый ход определится из соотношения

$$\delta = \frac{A}{at} z,$$

где A — цена оборота винта в мм;

a — число заходов;

t — шаг резьбы в мм;

$z = 0{,}0065 \sqrt{at}$ — гарантированный зазор.

Рассчитаем мертвый ход для зубчатой передачи датчика обратной связи по положению на продольной подаче станка 6М13-ГН1, $m = 1$, $z = 56$, межцентровое расстояние 63 мм, класс точности — 7, коэффициент $k_1 = 0{,}005$, цена оборота винта (по кинематической схеме станка) $A = 0{,}32$ мм; тогда

$$\delta = 0{,}005 \frac{0{,}32}{1{,}56} \cong 0{,}00003 \text{ мм}.$$

При измерении реального мертвого хода в этой же передаче зазор составил 0,00008 мм, что вызывает фазовую ошибку при слежении примерно 0,08°. Такая ошибка по углу может в фазовой системе ЧПУ изменять скачком скорость движения рабочего органа станка.

После того как будет проведен расчет мертвого хода, необходимо найти предельно допустимую величину зазора, которая определяется в зависимости от точности и надежности работы узла или системы станка. Допустимая величина для разных узлов системы станка будет различной. Например, для зубчатого зацепления датчика обратной связи эта величина будет одна, и она влияет на систему управления, для передачи винт—гайка величина этого зазора другая, но в сумме эти мертвые хода влияют на точность обработки детали.

Для многих механизмов станка предельно допустимые величины износа кинематических пар определяются из условия обеспечения заданного положения ведомого звена. При этом для большинства случаев характерна следующая зависимость между износом отдельных кинематических пар δ_k, допустимой величиной отклонения Δ ведомого звена от заданного положения и величиной возможной компенсации износа механизма

$$\sum_{k=1}^{n} \delta_k i_k = \Delta + e,$$

где δ_k — величина реального износа в мм;
i_k — передаточное отношение отдельного звена;
Δ — допустимая величина отклонения ведомого звена в мм;
e — величина регулировки выбора зазора отдельного звена в мм.

Если ведомым звеном является узел, несущий инструмент или заготовку, то отклонение Δ от заданного положения непосредственно связано с заданной точностью станка.

Мертвый ход приводит к двум недостаткам в системе слежения станков с ЧПУ: 1) форма выходного сигнала становится искаженной; 2) выходной сигнал отстает по времени от входного. С точки зрения устойчивости фазовой системы ЧПУ опасным является второе обстоятельство, так как всякое отставание в замкнутой системе управления ухудшает ее устойчивость.

Пользуясь методом осциллографирования работы привода подачи, можно определить характер поведения системы при наличии в ней зазора, но место появления его можно определить только при исследовании всех звеньев кинематической цепи и здесь нужны другие методы.

Для обеспечения нормальной работы станка точность механических узлов и деталей в процессе эксплуатации должна постоянно контролироваться и, в случае отклонений за допустимые пределы, узлы и детали должны заменяться.

Точность ответственных зубчатых колес станка с ЧПУ может быть проверена несколькими способами. Одним из наиболее точных способов контроля формы зубьев зубчатых колес, колебания толщины и ошибки профиля зубьев является сравнение реального профиля с теоретическим с помощью проекционного аппарата. Этим методом можно обнаружить также ошибку нормального шага, которая является максимальной разностью измерений между двумя смежными зубцами, т. е. физическое смещение зубьев от их точного теоретического расположения.

Наиболее простым способом измерения ошибки (зазора) положения валов является проверка ее с помощью измерительных шкал. Хотя измерение с помощью шкал возможно только при статических условиях, можно пользоваться им и при динамических условиях, прибегая к фотографированию. Например, если требуется определить относительное угловое положение валов во время их движения, можно укрепить на них шкалы и стрелки и сфотографировать их. Применение строботрона обеспечивает вспышку яркого света в точно заданное время. Угловая ошибка может быть получена преобразованием ее в электрическое напряжение с последующим измерением обычными измерительными приборами или записью этого напряжения на осциллограмму. Вследствие неточности преобразовательных средств этот метод контроля является более грубым, чем проверка с помощью измерительных шкал.

Одним из способов повышения точности станков с ЧПУ является совершенствование их механической части и, в частности, направляющих. Качество направляющих влияет на точность обрабатываемой детали, поэтому им должно быть уделено особое внимание. Недостатки направляющих особенно сказываются на точности при обработке деталей на станках с незамкнутой системой упра-

вления, к которым относятся станки типа 6Н13-ГЭ2, ГФ-770, ФП-4 и др. Увеличение трения в направляющих этих станков вследствие наклепа металлической стружки (особенно из алюминиевых сплавов), загрязнения смазывающей жидкости и эксплуатационного износа приводит к искажению программы и точности обработки детали.

Рассмотрим влияние трения по одной из координат на поведение двухкоординатной системы при обработке угла прямоугольника. Характер движения рабочих органов показан на рис. 65. На рисунке представлен момент времени, когда инструмент из-за наличия трения (нагрузки) и нежесткости системы имеет скоростную ошибку. Точка *I* центра инструмента (фрезы) должна представлять заданное положение инструмента, но из-за наличия трения она находится в точке *II*, т. е. отстает от точки *I* на величину скоростной ошибки $\delta_{тр}$, а так как в этот момент времени системы движения точки *I* по оси *Y*, заданные в программе, прекратились, то движение по оси *Y* начинает замедляться. В этот же момент времени изменяется направление движения инструмента, т. е. начинает разгоняться инструмент по оси *X*. В результате сложения двух движений — замедленного по оси *Y* и ускоренного по оси *X* — инструмент опишет какую-то кривую, изображенную на рис. 65, в виде дуги с радиусом *R*, сопряженную со сторонами прямоугольника. Таким образом, центр фрезы в случае наличия трения в одном из приводов подач фрезерного станка с ЧПУ вместо прямого угла опишет кривую, что приведет к погрешности обработки детали.

Постоянства силы трения в диапазоне скоростей подачи и значительного снижения трения покоя, а следовательно, и равномерности движения на малых скоростях в случае направляющих смешанного трения можно достичь путем применения антискачковых масел, например масла ВНИИНП-401, которое выпускается нашей промышленностью.

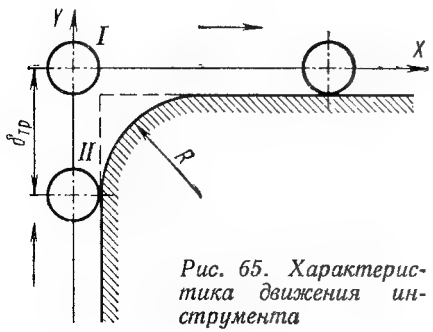


Рис. 65. Характеристика движения инструмента

Для того чтобы судить о состоянии направляющих и винтовых передач, необходимо знать момент холостого хода таких передач.

Существует расчетный метод определения момента холостого хода передачи. Например, момент холостого хода передачи винт—гайка качения определится из уравнения [33]

$$M_x = P_{наг} z_{расч} \sin \alpha \frac{d_{кв}}{2} [\sin (\lambda + \rho) - \sin (\lambda - \rho)],$$

где M_x — момент холостого хода в кгс/см;
$P_{наг}$ — допустимая осевая нагрузка в кгс;
$z_{расч}$ — расчетное число шариков;
$d_{кв}$ — диаметр контакта винта с шариком в см;
λ — угол наклона винтовой линии резьбы;
ρ — приведенный угол трения;
α — угол контакта шарика (обычно 45°).

Если воспользоваться таблицами приложения II в книге [33], можно рассчитать момент для передачи винт—гайка, а измерив реальный момент в передаче с помощью динамометра, сравнить с расчетным. Если реальный момент передачи не превышает 5% от расчетного, то можно с уверенностью сказать, что данная передача находится в норме. Если реальный момент превышает допуск, то необходимы разборка передачи и выяснение причин завышения момента. Аналогично можно решить такую же задачу и для других типов передач.

Глава IV

Комплексные испытания станков с системами ЧПУ

§ 1. ПРОВЕРКА СИСТЕМЫ СТАНКА С ЧПУ ТЕСТ-ПРОГРАММАМИ

Проблема обеспечения надежности станков с системами ЧПУ тесно связана с вопросами их проверки и испытания в процессе эксплуатации. Как известно из теории автоматического регулирования, в зависимости от вида контрольного сигнала изменяется и характер реакции системы, т. е. контрольному сигналу определенной формы, если система работоспособна, должна соответствовать вполне определенная по характеру реакция. Анализируя характер реакции системы на воздействующие контрольные сигналы, можно определить наличие неисправности в узлах и блоках системы ЧПУ. В ряде случаев можно осуществить оценку работоспособности системы по показателям качества переходного процесса, т. е. параметрам переходной характеристики, таким как крутизна, максимальное перерегулирование, колебательность, время и ошибка регулирования.

Оригинальный метод проверки системы на работоспособность и определение неисправности в системе предложен А. В. Мозгалевским и др. [26]. Он основан на анализе деформации тест-сигнала (или тест-программы) при прохождении его через контролируемый узел, блок или систему. Этот же метод может быть применен и при проверке системы ЧПУ станками. При воздействии испытательной программы на систему ЧПУ при прохождении ее через проверяемый участок системы сигнал будет изменяться, а степень его изменения будет зависеть от структуры участка системы и значения параметров отдельных его узлов и блоков. В связи с этим всякое изменение характеристики узла или блока системы скажется на характере изменения сигнала. Деформацию контрольного

сигнала при прохождении, например, по электронному блоку системы ЧПУ можно обнаружить по изменению формы и амплитуды электрического сигнала с помощью световых или электронных осциллографов, причем если в блоке имеется неисправность, то характер изменения формы и амплитуды сигнала будет отличен от сигналов в исправном блоке. Так как при прохождении испытательного сигнала в системе ЧПУ величины электрических параметров в различных точках системы будут различны, то обнаружение работоспособности или неисправности, возникающей в системе ЧПУ, можно проверить только по тем параметрам, которые обладают достаточной чувствительностью ко всем изменениям, происходящим в системе. Выбор точек и параметров, контролируемых при прохождении испытательного сигнала, зависит от конкретной системы ЧПУ и определяется ее структурной схемой.

Важным вопросом при проверке работоспособности и определении неисправностей в системах ЧПУ, является выбор тест-сигнала или тест-программы. Обычно для определения характеристик следящей системы, каковой является система станка с ЧПУ, используется ступенчатый или скачкообразный сигнал. Использование для определения работоспособности ступенчатого сигнала наиболее целесообразно, поскольку можно проконтролировать реакцию системы и проанализировать деформацию контрольного сигнала.

Использование ступенчатого сигнала для испытания и проверки систем ЧПУ целесообразно, так как при его воздействии на следящий привод станка с системой ЧПУ по реакции привода можно судить о переходной характеристике системы.

Так как системы ЧПУ выполняются в двух вариантах: незамкнутая и замкнутая, то в зависимости от типа системы применяют и различные методы их проверки.

Если проверяется незамкнутая система, то на ее вход подают контрольные сигналы, а на выходе проверяют перемещение рабочих органов станка и правильность выполнения вспомогательных и технологических команд. Под проверкой перемещения рабочих органов здесь понимается точность перемещения в соответствии с заданной программой, скорость и ускорение перемещения, которые также заданы в программе, в соответствии с паспортными данными станка.

Если проверяется замкнутая система, то на вход подается сигнал рассогласования, а на выходе проверяется величина этого рассогласования и по величине ошибки оценивается работа системы и станка. В замкнутой системе также проверяют точность перемещения, скорость и ускорение и выполнение вспомогательных и технологических команд в соответствии с заданной программой.

Метод граничного контроля применяется для предсказания времени и места появления возможных отказов элементов, узлов и блоков. При этом методе изменение параметров элементов, узлов и блоков системы ЧПУ проверяется при предельно допустимых значениях воздействующих на них сигналов. Например, для станков с ЧПУ модели 6Н13-ГЭ2 частота следования импульсов, по паспортным данным, составляет 600 Гц, а предельная частота шагового привода, применяемого в системе станка, 800 Гц. Очевидно, граничной частотой для проверки системы станка будет 800 Гц, причем при вводе в систему такого параметра можно проверить весь тракт системы от вводных устройств (магнитной головки) до конечного звена (шагового двигателя).

Другим примером граничного контроля может быть, например, предельно допустимый скачок по скорости для станка типа ФП-7 с фазовой системой числового программного управления. По паспортным данным, предельно допустимый скачок по скорости определен в 5 мм/с на всем диапазоне изменения скорости движения рабочих органов от 0 до 25 мм/с. Для проверки такой системы необходимо заложить в тест-программу разгон рабочих органов станка ступенями, т. е. 0—5—10—15—20—25 мм/с, причем аналогично необходимо программировать и снижение скорости, т. е. 25—20—15—10—5—0 мм/с. Следует также учитывать и изменение направления движения рабочих органов при том же наборе скоростей. А для того чтобы сократить время испытания, необходимо в тест-программе предусмотреть проверку всех координат одновременно.

Контроль правильности выполнения тест-программы одинаков для всех систем ЧПУ и включает в себя две операции контроля перемещения по линейным размерам, скорости и ускорению и выполнения вспомогательных и технологических команд. Выполнение вспомогательных и технологических команд может контролироваться построением логических схем, учитывающих их последо-

вательность и выдающих сигнал ошибки в случае нарушения этой последовательности.

Контроль величины перемещения может быть осуществлен подсчетом количества импульсов унитарного кода и той информации, которая занесена в тест-программу. В этом случае объем счетчиков должен быть равен количеству импульсов перемещения, заложенных в тест-программе.

После выбора в системе ЧПУ точек входа и выхода контрольного сигнала его деформация может определяться или вышерассмотренным методом, или коэффициентом передачи от выбранного входа к выбранному выходу. Оценивая изменение коэффициента передачи, который определяется изменением параметров элементов, узлов и блоков системы ЧПУ, можно обнаружить возникшую в системе неисправность.

Если деформация тест-программы оценивается по изменению амплитуды сигнала, то в заведомо исправной системе должны быть определены все величины сигнала с предельно допустимыми отклонениями. Если деформация тест-программы оценивается по величине сдвига фазы, то должны быть определены допустимые пределы отклонения сигналов по фазе.

При записи работы системы станка типа ФП-7 при отработке тест-программы на осциллограмму исследовалась работоспособность всей системы. Сигнал снимался с конечного звена системы управления (тахогенератора). Из осциллограммы видно, что в момент набора скорости скачком наблюдается колебательность переходного процесса; это же наблюдается и при сбросе скорости.

При проверке точности перемещения на осциллограмме записывался и этот параметр. В тест-программе для каждой скорости запрограммировано линейное перемещение в 25 мм, кроме скорости 25 мм/с, где линейное перемещение равно 50 мм. На осциллограмме можно подсчитать это перемещение с учетом скорости протягивания бумажной ленты. При наличии в системе неисправности на осциллограмме при таком методе проверки были бы видны отклонения от нормы.

Проводилась проверка по тест-программе системы станка с ЧПУ типа 6Н13-ГЭ2. Осциллограмма снималась с обмоток шагового двигателя при максимальной частоте следования импульсов. Характерным для данной осциллограммы является то, что на ней виден сдвиг сигналов

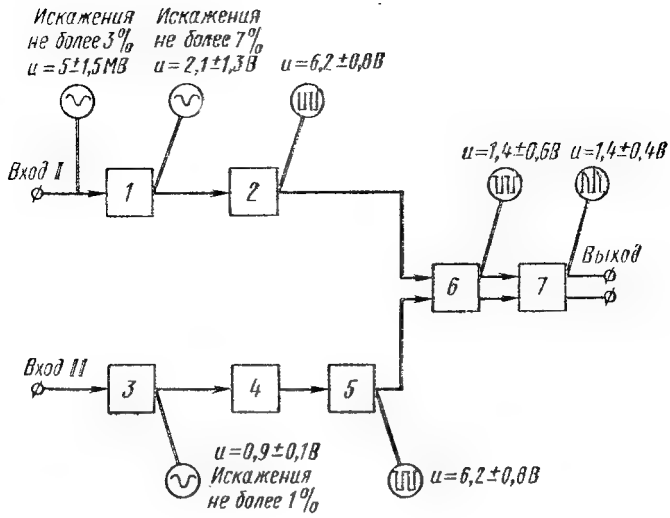


Рис.66. Функциональная схема электронного блока фазовой системы ЧПУ:

1 — усилитель считывания; *2* — усилитель-ограничитель управляющего сигнала; *3* — суммирующая цепочка; *4* — усилитель опорного сигнала; *5* — усилитель-ограничитель опорного сигнала; *6* — триггер (фазовый дискриминатор); *7* — балансный усилитель

на 120°, форма и величина сигнала, проходящего по обмоткам шагового двигателя.

На рис. 66 представлена функциональная схема электронного блока фазовой системы ЧПУ станка ФП-7, на которой выбраны точки контроля параметров системы и указаны форма сигнала, величина и допустимые отклонения. При подаче в систему контрольного сигнала с помощью контрольных приборов всегда можно проследить прохождение сигнала и дать оценку: исправна система или нет. Обнаружение неисправности происходит с помощью компаратора—устройства, в котором оценивается уровень сигнала, снимаемого с входов и выходов исследуемого блока, по принципу «годен—не годен больше и не годен меньше». В компараторе должна быть предусмотрена индикация для фиксирования полученной информации о состоянии контролируемого блока и схема звуковой сигнализации, выполняющая функцию привлечения внимания наладчика.

При оценке эффективности контроля системы ЧПУ тест-программой необходимо учитывать не только полноту

контроля и объем контролируемой аппаратуры, но и время, периодичность и простоту выполнения контрольной проверки.

Объем контролируемой тест-программы зависит от типа системы ЧПУ; например, для систем управления, работающих от магнитной ленты, контроль в каждый период между временем обработки детали является наиболее эффективным, если время контроля $t_к$ составляет 0,5—1,0 мин, а время обработки $t_{обр}$ колеблется в пределах 10—160 мин. Время, в течение которого система ЧПУ может находиться в непрерывно включенном состоянии $t_{вкл}$, зависит от сменности работы и практически не превышает 16 ч. Но время включения состоит из интервалов обработки $t_{обр}$ и интервалов простоя $t_п$ системы во включенном состоянии, в течение которых подготовляется следующий цикл обработки. Обычно для станков с системами ЧПУ $\frac{t_п}{t_{обр}} = 0{,}1 \div 0{,}5$. Отсюда очевидно, что время контроля 0,5—1,0 мин является вполне приемлемым для простых систем ЧПУ с магнитной лентой. Для сложных систем ЧПУ, состоящих из систем со встроенными интерполяторами, такой метод не дает существенного выигрыша, и наиболее целесообразным является метод прогнозирующего контроля.

При проверке систем, работающих от магнитной ленты, нельзя охватить контролем все элементы системы управления и регулирования. Например, с помощью тест-программы на магнитной ленте можно проверить только правильность перемещения рабочих органов и возможность отработки приводом максимальных скоростей и ускорения, но невозможно проверить направление движения рабочих органов, величину скорости в переходном режиме работы привода, т. е. при изменении направления движения, и т. д. При работе по программе, где заложено формообразование детали, в процессе ввода программы на магнитной ленте нельзя проконтролировать выполнение операций формообразования детали. Контроль выполнения операций формообразования может быть выполнен только после того, как изготовлена деталь. По ее геометрическим размерам можно проверить правильность выполнения системой станка операций, заложенных в программе.

Наличие резерва времени $t_п$ в период между обработкой деталей позволяет применять для сложных систем прогнозирующий контроль. Прогнозирующий контроль

зависит от типа интерполирующего устройства и включает операции перемещения рабочих органов станка и выполнение вспомогательных и технологических команд. Его режиму соответствуют граничные условия функционирования, что позволяет обнаружить скрытые дефекты до того, как они смогут повлиять на работу системы во времени обработки детали. Контроль выполнения вспомогательных и технологических команд может быть выполнен путем построения логических схем, учитывающих их последовательность и выдающих сигнал ошибки в случае нарушения этой последовательности или при появлении на выходе более одной команды. Контроль величины перемещения может быть осуществлен подсчетом количества импульсов унитарного кода (в этом случае объем счетчика должен быть равен количеству импульсов перемещения, заложенного в прогнозирующей программе). Эффективность прогнозирующего контроля зависит от его периодичности и объема контролируемых узлов и блоков системы.

При практическом использовании метода прогнозирующего контроля целесообразно определять не периодичность контроля, а максимально допустимую длительность программы в зависимости от задаваемой вероятности качественного изготовления детали и параметров надежности системы ЧПУ, для которой рассчитывается прогнозирующая программа.

Анализ применения прогнозирующего контроля для сложных систем ЧПУ показывает, что, например, при периодичности контроля в один час эквивалентная надежность системы повышается в среднем до 1000 ч времени наработки на отказ для отдельных узлов и блоков системы. Ни один из других методов контроля не обеспечивает такого высокого уровня надежности.

В целях сокращения времени проверки системы ЧПУ и для простоты выполнения операций контроля можно использовать программный контролирующий и прогнозирующий вид контроля, который включает следующие операции: а) отключение приводов подач; б) включение прогнозирующих режимов; в) отработку тест-программы; г) оценку правильности выполнения тест-программы; д) включение рабочих режимов системы и станка.

Для системы ЧПУ со встроенными интерполяторами может быть предложен автоматический прогнозирующий контроль, при котором все операции, перечисленные выше, выполняются автоматически без участия опера-

тора. В этом случае рабочая программа состоит из двух частей: контролирующей и программы обработки детали. Расчет контролирующей программы выполняется на этапе разработки системы ЧПУ и ее содержание неизменно в течение всего времени эксплуатации. Правильность выполнения рабочей программы целесообразно оценивать контролем по модулю для информации о перемещениях и контролем последовательности выполнения команд для программы вспомогательных и технологических команд.

Для системы ЧПУ со встроенными интерполяторами (например, станки моделей МА-6545 и МА65-Ф3) программа обработки детали записывается на перфоленту. По такой программе обрабатываемый контур разбивается на участки, представляющие собой либо отрезки прямых, либо дуги окружности. Каждый такой участок задается кадром, состоящим из адресов и числовой информации. Каждый кадр начинается с контрольного символа. Для проверки правильности ввода данного кадра в управляющую машину производится контроль суммы числового значения вводимой информации по модулю девять. Например, для обработки отрезка прямой на перфоленте записана информация (фраза)

4 В6022 Е 0 00121 Д 1 01256 Н00,

где 4 — контрольное число —K_c;
В6022 — номер кадра;
Е — адрес (т. е. по какой координате идет обработка);
0 — направление перемещения по данному адресу;
00121 — величина перемещения по данному адресу;
Д — адрес (обозначение координаты);
1 — направление перемещения;
01256 — величина перемещения по координате;
Н00 — конец кадра.

Контрольный символ определяется из соотношения

$$K_c = 9 - R\left(\frac{\Sigma_k}{9}\right),$$

где $R\left(\frac{\Sigma_k}{9}\right)$ — остаток от деления суммы чисел фразы на 9.

Сумма получается от суммирования всех строк фразы, включая и адреса.

В нашем примере сумма чисел кадра составляет

$$(8 + 6 + 0 + 2 + 2) + 1 + 0 + (1 + 2 + 1) + 2 + \\ + 1 + (1 + 2 + 5 + 6) + (0 + 0 + 0) = 41.$$

При делении на девять получим остаток 5; следовательно, контрольное число равно 4.

Для проверки готовности управляющей машины к работе у нее имеется специальный режим «профконтроль». В этом режиме вся числовая информация о перемещениях по координатам вводится в машину и машина контролирует информацию по контрольному числу.

§ 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ СТАНДАРТНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Вопросы проверки работоспособности и качества функционирования сложных систем, которые являются системами числового программного управления станками, приобретают в процессе эксплуатации исключительно важное значение и рассматриваются как один из эффективных этапов повышения надежности систем ЧПУ.

Контроль состояния аппаратуры станков с ЧПУ можно осуществлять либо обычными инструментальными методами с применением серийных измерительных приборов: осциллографов, ламповых вольтметров, генераторов, частотомеров и т. д., либо специальными измерительными устройствами, осуществляющими измерения тех параметров системы ЧПУ, которые обычными измерительными приборами не производятся. Проектирование измерительных и специальных приборов должно осуществляться так, чтобы отказы их не оказывали непосредственного влияния на работоспособность контролируемой аппаратуры системы ЧПУ.

Обслуживающий персонал на основании данных, получаемых от устройств контроля, а также на основании непосредственного наблюдения за работой системы управления станком с ЧПУ делает вывод о ее исправности.

Одной из основных задач правильной эксплуатации систем ЧПУ является установление параметров, подлежащих контролю. Такие параметры должны характеризовать работоспособность системы и обеспечивать поддержание ее характеристик в допустимых пределах.

К контролируемым параметрам систем ЧПУ относятся выходные характеристики системы (скорость движения рабочих органов станка, точность линейных перемещений), а также параметры, позволяющие косвенно оценивать работоспособность системы (ускорение, прохождение информации по каналам системы, перепады скоростей, давление в гидросистеме, выходные токи электромеханического преобразователя и др.). При выборе контролируемых параметров необходимо также исходить из назначения отдельных блоков и узлов аппаратуры числового программного управления и конечной цели контроля. Очевидно, что конечной целью любой контрольной аппаратуры может быть только контроль работоспособности отдельных узлов и блоков системы станка с ЧПУ, отыскание неисправности в блоке или узле и возможность прогнозирования отказов в данной аппаратуре.

При проверке работоспособности станка с ЧПУ для сокращения времени контрольных операций целесообразно выбирать минимальное количество контролируемых параметров, которые позволили бы иметь представление о исправности системы управления и готовности к выполнению обработки деталей на станке по программе. При отыскании неисправностей в системе ЧПУ станка число контролируемых параметров может также определяться количеством сменных узлов и блоков, так как при этом время восстановления системы ЧПУ будет сведено к минимуму. Время восстановления будет определяться временем поиска неисправного блока (узла) и временем замены его на заведомо исправный и работоспособный.

При использовании системы контроля для прогнозирования отказов целесообразно получать информацию не только о том, годен или не годен отдельный блок или узел, но также знать характер изменения его основного параметра в то время, когда его величина еще не вышла за пределы допустимого. Для прогнозирования отказов целесообразно измерять такие параметры, изменение которых наиболее полно характеризует процессы износа и разрегулировки настройки и тем самым позволяет предупредить отказ системы или отдельного блока (узла). Например, при изменении силы натяжения магнитной ленты в лентопротяжном механизме, система станка будет еще функционировать, но наличие изменения такого параметра может быть потенциальным носителем отказа данного узла.

В качестве первого контролируемого параметра в станках с системами ЧПУ, работающих от программоносителя на магнитной ленте, выбирают уровень сигнала, считываемого с магнитного носителя, который позволяет определить наибольшее значение вероятности работоспособности системы управления станком.

Обычно для визуального контроля уровня сигнала используют стандартные милливольтметры или осциллографы требуемого класса точности и определенного диапазона измерений, например милливольтметры В3-13, В3-2А или В3-7 и осциллографы С1-1, С1-16. Но так как при считывании сигнала с магнитного носителя в станках с ЧПУ необходимо контролировать сразу четыре уровня сигнала (минимум), то применение стандартных приборов крайне неудобно. Для одновременного измерения этого параметра необходимо иметь прибор с многоканальным измерителем. В этих целях может быть использован специальный прибор — четырехканальный измеритель уровня сигналов. Прибор смонтирован в переносном ящике и состоит из четырех одинаковых измерительных каналов. Принципиальная электрическая схема прибора показана на рис. 67.

Схема каждого канала (*1*, *2*, *3*, *4*) состоит из эмиттерного повторителя, двухкаскадного усилителя и измерителя. Эмиттерный повторитель собран на транзисторе *Т1* и служит для согласования выхода магнитной головки с входом измерительного усилителя. Усилитель собран на транзисторах *Т2* и *Т3*, нагрузкой которых является измерительный мост, собранный на диодах *Д2—Д5*, и измеритель *И* (микроамперметр М-24, 100 мкА). Питание схемы осуществляется от блока *5*. Прибор позволяет измерить одновременно уровень по четырем каналам в пределах от 0 до 10 мВ. Применение такого прибора позволяет быстро и достаточно точно выяснить, где и на каком участке магнитного носителя сигналы меньше нормы.

Немаловажную роль при последовательном контроле работоспособности системы ЧПУ имеет и контроль конечных элементов системы. К такому контролю можно отнести проверку выходных токов балансного усилителя, конечного звена электронной схемы фазовой системы управления станком, нагрузкой которого являются обмотки электромеханического преобразователя. При настройке балансного усилителя необходимо постоянно контролировать токи в обмотках преобразователя, так как небольшой

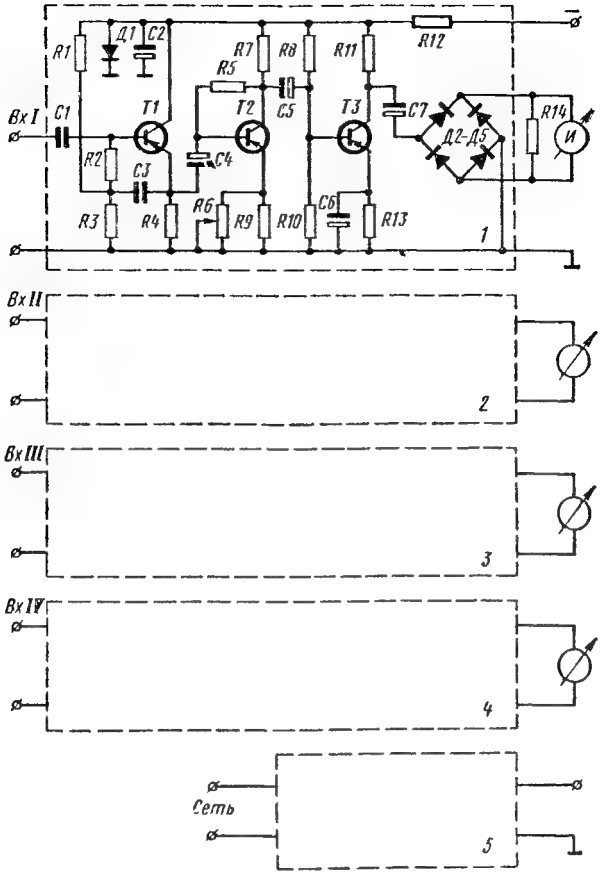


Рис. 67. Принципиальная схема измерителя уровня считывания сигнала с магнитной ленты:

1—4 — блоки милливольтметров; *5* — блок питания; *T1*, *T2*, *T3* (МП-14) — транзисторы; *Д1—Д3*, *Д4* (Д1601) — диоды; *И* — измеритель, микроамперметр типа М-24 на 100 мкА; *R1* (51 кОм), *R2* (39 кОм), *R3* (5,1 кОм), *R4* (5,1 кОм), *R5* (91 кОм), *R6* (180 Ом, ПП-3), *R7* (5,1 кОм), *R8* (68кОм), *R9* (100 Ом), *R10* (10 кОм), *R11* (5,1 кОм), *R12* (1,2 кОм), *R13* (300 Ом), *R14* (390 Ом) — резисторы; *C1* (1 мкФ), *C2* (100 мкФ), *C3* (1 мкФ), *C4*, *C5* (10 мкФ), *C6* (20 мкФ), *C7* (10 мкФ) — конденсаторы

разбаланс токов при нулевом рассогласовании воздействующего сигнала вызовет движение рабочих органов станка, что недопустимо для данной системы ЧПУ. Для этих целей могут быть использованы любые амперметры, но более удобным контролирующим прибором может

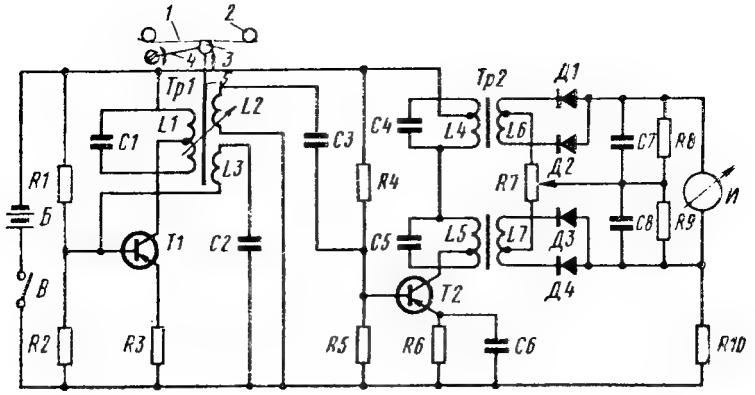


Рис. 68. Принципиальная схема динамометра для измерения натяжения магнитной ленты:

Т1, Т2 (МП-26) — транзисторы; *Д1, Д2, Д3, Д4* (Д9Ж) — диоды; ТР1 — транзистор, выполнен на катушке из фторосплава, в качестве сердечника используется ферритовый стержень диаметром 3 мм и длиной 20 мм; ТР2 — трансформатор, выполнен на броневом сердечнике СБ-2; *R1* (43 кОм), *R2* (15 кОм), *R3* (100 Ом), *R4* (15 кОм), *R5* (3,9 кОм), *R6* (36 кОм), *R7* (3,3 кОм), *R8, R9* (91 кОм), *R10* (820 кОм) —резисторы; *С1* (0,083 мкФ), *С2, С3* (10 мкФ), *С4, С5, С6* (0,1 мкФ), *С7, С8* (2 мкФ) — конденсаторы; *И* — измерительный микроамперметр М24 на 100 мкА; *Б* — две последовательно соединенные батареи КБС; *В* — выключатель ТП-2-1

быть специально смонтированный переносной малогабаритный сдвоенный миллиамперметр, состоящий из двух приборов модели М-4202 на 600 мА.

При определении работоспособности лентопротяжного механизма системы ЧПУ необходимо контролировать силу натяжения магнитной ленты при протягивании ее в лентопротяжном тракте. От неравномерности силы натяжения магнитной ленты при перемотке и воспроизведении появляется слабая намотка на катушки, которая может привести к отказам лентопротяжного механизма, или очень плотная намотка, которая приводит к обрывам магнитной ленты, появлению на краях ленты надрывов (подсечек) и сильному вытягиванию, приводящему к саблевидности ленты (вытягиванию одного края магнитной ленты).

Наиболее простая и удобная конструкция динамометра, принципиальная схема которого изображена на рис. 68, позволяет измерять силу натяжения магнитной ленты в лентопротяжных механизмах станков с ЧПУ. Пределы измерений прибора — от 0 до 1,5 кгс при ширине магнитной ленты от 6 до 35 мм. Питание прибора осуще-

ствляется от двух батарей типа КБС. Погрешность прибора при измерениях ±5%. Размеры прибора без динамометра 160×100×100 мм. Динамометр сделан выносным и подключен к прибору с помощью кабеля.

Принцип работы прибора основан на преобразовании механического перемещения сердечника катушки задающего генератора в изменение частоты, которая при помощи частотного детектора преобразуется в изменение величины постоянного тока. Изменение величины постоянного тока фиксируется измерителем, проградуированным в абсолютных значениях величины силы натяжения магнитной ленты. Задающий генератор собран на транзисторе *Т1* по схеме автогенератора с индуктивной автотрансформаторной связью. Изменение частоты генератора происходит за счет изменения индуктивности катушки *L1*, сердечник которой связан с динамометром. При движении магнитной ленты *1* по направляющим роликам *2* под действием силы натяжения ленты подвижный ролик *3* вместе с сердечником катушки *5*, преодолевая силу возвратной пружины *4*, изменяет свое положение в катушке задающего генератора, частота которого при этом изменяется. Если при первоначальном положении сердечника частота генератора была f_0, то при изменении положения сердечника частота будет $f_к$. Сигнал, который снимается со вторичной обмотки *L2* трансформатора *Тр1*, передается на частотный детектор. Детектор собран на транзисторе *Т2*, в коллекторной цепи которого имеются два контура *L4* и *L5*, каждый из них настроен соответственно на частоту $f_0 - f_к$ и $f_0 + f_к$. При частоте генератора f_0 на вторичных обмотках трансформатора *Тр2* вырабатывается напряжение, одинаковое по величине и фазе. При этом на измерителе показания будут равны нулю. При изменении частоты генератора напряжение в одной из обмоток (*L6* или *L7*) будет больше, а в другой меньше (*L7* или *L6*), и эта разность будет индикатироваться измерителем. Применение такого прибора позволило повысить надежность лентопротяжного механизма системы ЧПУ и, кроме того, для большой группы станков позволило привести в одинаковое состояние все лентопротяжные механизмы, обеспечив тем самым взаимозаменяемость станочных систем.

Опыт эксплуатации станков с ЧПУ на ряде заводов показывает, что для надежной работы систем ЧПУ необходимо обеспечить качественную запись информации на магнитную ленту. На выпускаемых серийно установках

записи (ЛКП-02-60, ПЗК-3-61, УМС-2 и ЛКИФ) не предусмотрено никаких средств контроля вносимой на магнитный носитель информации. Поэтому заводы, внедряющие в производство станки с ЧПУ, применяют для этих целей контрольные счетчики, построенные на шаговых двигателях ШД-4, или контрольные столы (координатографы), на которых в процессе записи программ на магнитную ленту вычерчивается траектория движения центра фрезы. В первом случае контроль ведется по стрелкам счетчика. Так как каждому импульсу, записанному на магнитную ленту, соответствует поворот шагового двигателя на 1,5°, полный оборот стрелки счетчика будет получен за 240 импульсов. Если же ошибка будет кратная 240 импульсам, то такой счетчик эту ошибку не зафиксирует. Во втором случае получаемая информация о движении центра инструмента отличается большей наглядностью, но при этом отсутствует информация о числовом значении программы, записанной на ленту, т. е. при применении таких контрольных средств можно пропустить ошибку при проверке числовой информации. Еще сложнее определить прохождение числовой информации при воспроизведении программы на станке. Такой контроль, как правило, ведется по линейкам, установленным на станке, с дополнительным контролем формы обрабатываемой детали и позволяет определить качественное прохождение числовой информации с магнитной ленты по всей системе управления станком. Однако при потере информации в системе ЧПУ бывает невозможно установить, в каком месте это происходит. Универсальные приборы типа осциллографа, хотя и позволяют выяснить наличие сбоя в системе, но также не дают сведений о количестве потерянной информации.

С целью совершенствования контроля числовой информации, переносимой с магнитной ленты в систему станка, можно применять покупные контрольные устройства.

Низкочастотный электронный счетчик импульсов ЭСИ-2 с двумя входами, блок-схема которого изображена на рис. 69, предназначен для счета импульсов с амплитудой от 2 до 100 В и частотой следования импульсов до 10 кГц. Переносной прибор служит для контроля числовой информации в системах ЧПУ. Емкость шкалы счетчика 1 000 000 импульсов. Входное сопротивление прибора по обоим входам не менее 0,2 МОм. Прибор рассчитан на эксплуатацию в нормальных цеховых условиях. Кон-

структивно счетчик выполнен в виде лабораторного прибора.

Функциональная схема прибора состоит из следующих элементов: стабилизированного электронного выпрямителя *9*, пересчетных декад *2* и *5*, ждущих мультивибраторов *3* и *6*, электромеханических счетчиков СБ-1М *4* и *7* и индикаторов на неоновых лампах *1* и *8*.

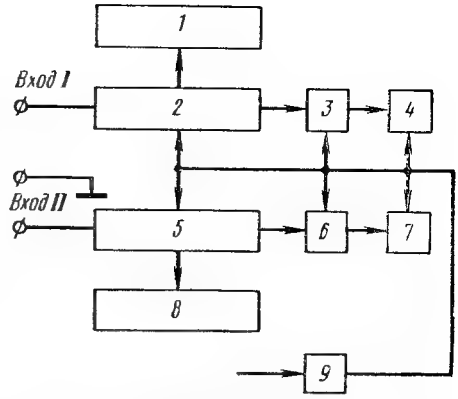


Рис. 69. Функциональная схема низкочастотного счетчика импульсов ЭСИ-2

Пересчетная декада состоит из четырех триггерных ячеек, осуществляющих пересчет на 16, и цепей обратной связи, которые уменьшают коэффициент пересчета до 10. В качестве индикаторов импульсов от 0 до 9 служат неоновые лампы. Первые девять импульсов индикатируются неоновыми лампами, после прихода десятого импульса сигнал с пересчетной декады *2* передается на вход ждущего мультивибратора *3*. В одной половине ждущего мультивибратора включена обмотка электромеханического счетчика СБ-1М с объемом числовой информации 100 000 импульсов. После прихода десятого импульса с пересчетной декады *2* электромеханический счетчик *4* перемещается на единицу и так после каждого десятого импульса. На рис. 70 приведен внешний вид счетчика ЭСИ-2.

Другой разновидностью контрольного счетчика для контроля числовой информации в системах ЧПУ является электронный счетчик ЭСИ-3 на декатронах, предназначенный для счета импульсов по трем координатам одновременно; емкость счетчика 1 000 000 импульсов по каждой координате. Система счисления в счетчике — десятичная с прямым отсчетом. Функциональная схема одной координаты счетчика изображена на рис. 71. Конструктивно прибор выполнен в виде лабораторного переносного устройства с блоком питания *1*. Пересчетное устройство каждой координаты сделано в виде отдельного блока. Каждая координата состоит из усилителя-ограничителя, триггера Шмитта *14* и пересчетного устройства, состоя-

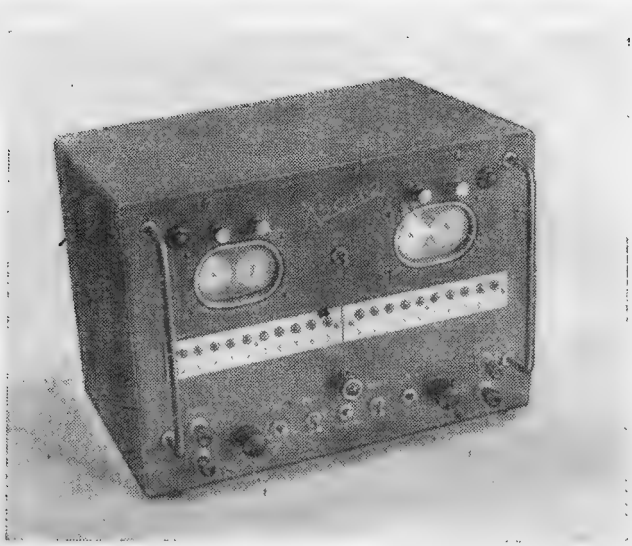


Рис. 70. Низкочастотный счетчик ЭСИ-2

щего из шести индикаторов-декатронов *2*, *4*, *6*, *8*, *10* и *12* и схем запуска декатронов *3*, *5*, *7*, *9*, *11* и *13*.

Нередко в процессе контроля какого-то параметра в системе станка с ЧПУ необходимо контролировать один и тот же параметр, но в разных цепях, например: форму сигнала с помощью одного осциллографа или величину сигнала с помощью одного вольтметра. Для этих целей может быть применен четырехканальный коммутатор, принципиальная схема которого изображена на рис. 72. Коммутатор состоит из четырех одинаковых каналов, собранных соответственно на транзисторах *Т1*, *Т2*, *Т3*, *Т4*; *Т5*; *Т6*; *Т7*; *Т8*, и запускающей схемы на транзисторах *Т9*, *Т10*. Все каналы могут включаться последовательно, но в процессе контроля при необходимости можно остановить схему на любом канале. Для этой цели существует цепь остановки измерений — кнопка «Стоп». Для контроля каналов измерения в коммутаторе, предусмотрена световая индикация каналов *Л1*, *Л2*, *Л3* и *Л4*. Схема запускается с помощью кнопки «Запуск». Коммутатор может быть применен с любым измерительным прибором, так как цепи коммутации независимы от цепей управления коммутатором.

Кроме электрических измерений, в процессе проверки работы систем ЧПУ нередко необходимо контролировать и

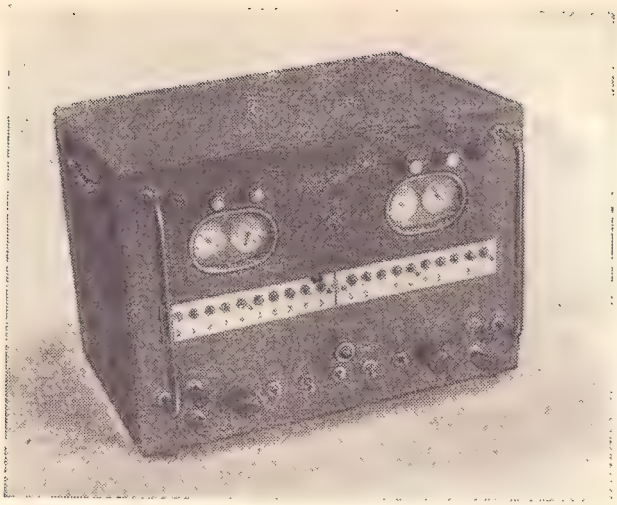


Рис. 70. Низкочастотный счетчик ЭСИ-2

щего из шести индикаторов-декатронов *2*, *4*, *6*, *8*, *10* и *12* и схем запуска декатронов *3*, *5*, *7*, *9*, *11* и *13*.

Нередко в процессе контроля какого-то параметра в системе станка с ЧПУ необходимо контролировать один и тот же параметр, но в разных цепях, например: форму сигнала с помощью одного осциллографа или величину сигнала с помощью одного вольтметра. Для этих целей может быть применен четырехканальный коммутатор, принципиальная схема которого изображена на рис. 72. Коммутатор состоит из четырех одинаковых каналов, собранных соответственно на транзисторах *Т1*, *Т2*, *Т3*, *Т4*; *Т5*; *Т6*; *Т7*; *Т8*, и запускающей схемы на транзисторах *Т9*, *Т10*. Все каналы могут включаться последовательно, но в процессе контроля при необходимости можно остановить схему на любом канале. Для этой цели существует цепь остановки измерений — кнопка «Стоп». Для контроля каналов измерения в коммутаторе, предусмотрена световая индикация каналов *Л1*, *Л2*, *Л3* и *Л4*. Схема запускается с помощью кнопки «Запуск». Коммутатор может быть применен с любым измерительным прибором, так как цепи коммутации независимы от цепей управления коммутатором.

Кроме электрических измерений, в процессе проверки работы систем ЧПУ нередко необходимо контролировать и

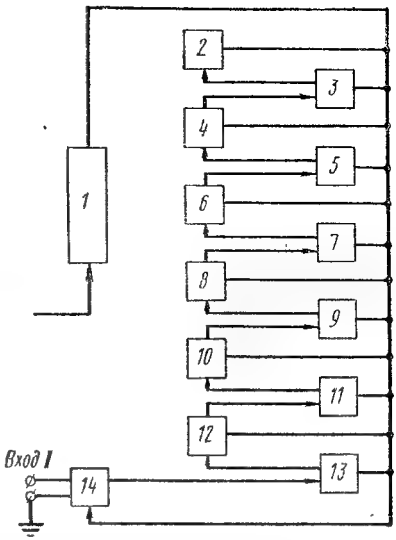


Рис. 71. Функциональная схема одной координаты счетчика импульсов ЭСИ-3

такие параметры, как давление в основном и подпиточном насосе гидросистемы станка. Для этих целей целесообразно применять обычные стандартные манометры. Однако они могут быть применены только в тех узлах гидросистемы, где изменения давления происходят медленно. В том случае, когда давление носит резко переменный характер, например переходный процесс при воздействии на систему скачкообразного сигнала, необходимо применять дистанционные индуктивные унифицированные манометры типа ДИМ.

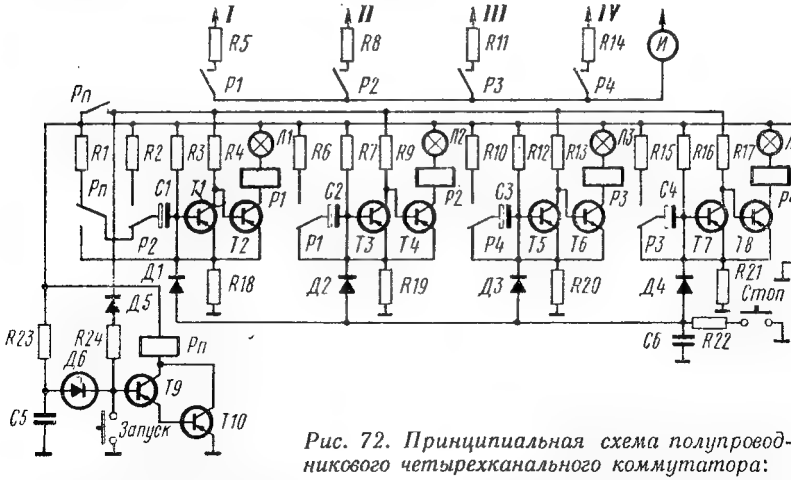


Рис. 72. Принципиальная схема полупроводникового четырехканального коммутатора:

Т1—Т5, Т6 (МП-41) — транзисторы; *Д1—Д4, Д5* (Д9Ж) — диоды; *Д6* (Д810) — стабилитрон; *R1* (10 кОм), *R2* (1,5 кОм), *R3* (300 кОм), *R4* (10 кОм), *R5*, *R6* (1,5 кОм), *R7* (300 кОм), *R8*, *R9* (10 кОм), *R10* (1,5 кОм), *R11*, *R12* (300 кОм), *R13* (10 кОм), *R14*, *R15* (1,5 кОм), *R16* (300 кОм), *R17*, *R18—R21* (30 Ом), *R22* (6,2 кОм), *R23* (9,8 кОм), *R24* (10 кОм) — резисторы; *С1—С4* (20 мкФ), *С5* (80 мкФ), *С6* (1 мкФ) — конденсаторы; *Л1—Л4* — лампы КМ-2, 12 В

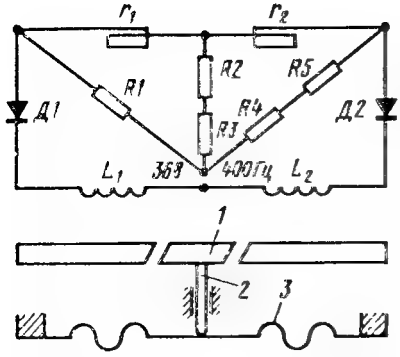


Рис 73. Схема датчика давления (R1—R5)

Электрические дистанционные манометры типа ДИМ предназначены для измерения избыточного давления жидкости и газа, имеющих пульсацию до 700 Гц. Манометр состоит из указателя типа УИ-1 и датчика давления типа ИД. Манометры охватывают диапазон измеряемых давлений от 0,8 до 300 кгс/см². Питание комплекта осуществляется от сети напряжением 36 В ±6% с частотой 400 Гц ±2%; сила тока, потребляемая датчиком, не превышает 1,5 А.

Принцип действия манометра основан на том, что под действием избыточного давления мембрана датчика *3* (рис. 73) деформируется. Через шток *2* эта деформация передается на якорь *1*, который изменяет воздушные зазоры магнитных цепей катушек L_1 и L_2. При этом в одной цепи зазор увеличивается, а в другой уменьшается. Это вызывает изменение индуктивности катушек L_1 и L_2. Так как схема питается переменным током, изменение индуктивности ведет к перераспределению токов в рамках логометра r_1 и r_2. Поэтому каждому положению якоря соответствует одно определенное положение стрелки указателя. В приборе используется магнитоэлектрический логометр. Для выпрямления тока в схему введены два германиевых выпрямителя *Д1* и *Д2*.

Применение датчиков от манометров ДИМ для измерения и контроля в системах станков с ЧПУ позволяет с помощью светолучевых осциллографов снимать картину изменения давления при переходных процессах в гидроприводах станков.

§ 3. СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАНКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ВНЕШНИМИ СИГНАЛАМИ

Установить состояние, в котором находится система, можно, определяя состояние элементов, узлов и блоков, из которых она изготовлена, или экспериментально проверяя возможность выполнения системой ее рабочих

функций, т. е. контролируя ее основные характеристики. В станках с ЧПУ выполнение рабочих функций определяется такими основными характеристиками системы, как максимальная скорость перемещения рабочих органов, максимально допустимый мгновенный перепад скоростей, предельно допустимое ускорение при разгоне и торможении системы станка, т. е. такими параметрами, которыми проверяются динамические свойства системы.

Для снятия характеристик и контроля работоспособности фазовых систем ЧПУ можно использовать специальную установку, которая позволяет без ввода в систему программы задавать перепады скоростей 100, 200 и 300 мм/мин при изменении скорости движения рабочих органов станка от 0 до 1500 мм/мин. Установка может также изменять диапазон ускорений приводов станка в пределах 30—120 мм/с^2 при разгоне и торможении рабочих органов станка. В установке предусмотрена проверка работоспособности системы станка при изменении направления движения рабочих органов. На рис. 74 представлена функциональная схема установки, принцип действия которой основан на том, что она выдает в систему станка с ЧПУ рассогласование в виде изменения фазы управляющего синусоидального сигнала относительно фазы опорного. Это изменение происходит за счет изменения частоты генератора управляющего сигнала [10].

Для испытания системы ЧПУ станком на нее с коммутатора выхода установки *4* подаются два сигнала: рабочий по координатам *X*, *Y* или *Z* и опорный (*ОС*) синусоидальной формы напряжением 8 мВ от управляющего *10* и опорного *16* генераторов. Генераторы *10* и *16* собраны по схеме *RC*-автогенераторов. Частота управляющего генератора изменяется в пределах от 211 до 289 Гц. В качестве элемента, меняющего частоту генератора, использован

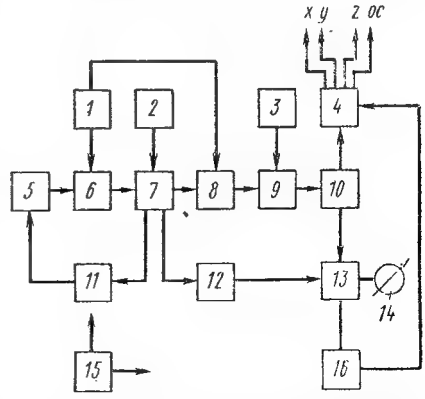


Рис. 74. Функциональная схема установки для испытания станка с фазовой системой ЧПУ (x, y, z — координаты, ОС — опорный сигнал)

двойной Т-образный четырехполюсник. Частота опорного генератора в процессе управления станком остается неизменной и равна 250 Гц. Регулировка частоты управляющего генератора достигается изменением сопротивления одного из плеч четырехполюсника. Сопротивление может изменяться ступенчато, с помощью ступенчатого переключателя частоты *3*, или плавно. Плавное изменение сопротивления (т. е. частоты) осуществляется двигателем постоянного тока *6*, скорость которого может регулироваться плавно или ступенчато. Ступенчатое изменение скорости двигателя осуществляется редуктором *7* при воздействии на переключатель скорости *2* и электромагнитной муфтой *8*, которая сцепляется с регулятором частоты *9*, с помощью блока реле *1*. Ступенчатое изменение скорости двигателя позволяет изменять скачком частоту управляющего генератора, а следовательно, и скорость и ускорение перемещения рабочих органов станка. Плавное изменение скорости двигателя осуществляется с помощью полупроводникового регулятора скорости *5*. Это необходимо для изменения частоты управляющего генератора, который при этом плавно меняет скорость движения рабочих органов станка. Для стабилизации скорости двигателя *6* в его цепь управления введена отрицательная обратная связь *11*. Датчиком обратной связи является тахогенератор.

Для контроля частоты (скорости, ускорения) управляющего генератора в установке предусмотрен измеритель частоты *14* с панелью измерителя частоты *13*. Сигнал для измерителя частоты снимается с индуктивного датчика скорости *12*, который кинематически связан с осью сопротивления, плавно изменяющего частоту управляющего генератора. Питание схемы осуществляется блоком *15*. В установке предусмотрено управление одновременно двумя или тремя координатами станка. При контроле системы с помощью такой установки и измерении выходных параметров станка в различных точках системы можно определять и неисправности отдельных узлов и блоков системы или контролировать всю систему.

В практике отладки следящего привода станков с ЧПУ часто возникает необходимость определения максимальных значений паспортных данных станков. Такую проверку можно также производить с помощью данной установки. Снимая подобные характеристики при различных режимах воздействия на систему станка, можно получить

полную картину динамических качеств исследуемой системы.

Как рассматривалось ранее, в зависимости от вида контрольного сигнала изменяется характер реакции системы, но контрольному сигналу определенной формы должны соответствовать определенные показатели качества регулирования величины, характеризующие поведение системы в переходном процессе, вызванном определенным внешним воздействием. К ним можно отнести пять показателей качества: крутизну, максимальное перерегулирование, колебательность, время и ошибку регулирования.

Время регулирования — это время, за которое динамическая система переходит из некоторого начального состояния к установившемуся новому (например, к состоянию равновесия). Время регулирования определяет длительность переходного процесса. Для процессов, асимптотически приближающихся к установившемуся движению, за время регулирования принимают время $T_п$ (рис. 75) окончательного вхождения системы в определенную зону допустимых отклонений δ, например в полосу, где выходная величина системы отличается от установившегося значения не более чем на $\pm 5\%$.

Максимальное перерегулирование — максимальное отклонение регулируемой величины (координаты) относительно нового или старого установившегося значения,

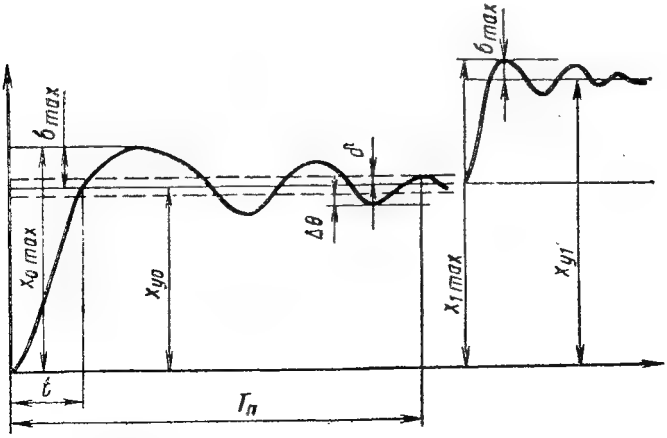


Рис. 75. График переходного процесса

выраженное в относительных единицах или в процентах. Обычно рассматривается перерегулирование, возникающее в устойчивой системе при переходном процессе, вызванном скачкообразным воздействием, или при определенной совокупности начальных условий. На рис. 75 показан переходный процесс с управляющим воздействием типа «скачка» или с начальным отклонением регулируемой величины. В этом случае максимальное перерегулирование

$$\sigma_{max} = \frac{x_{1max} - x_{y1}}{x_{y1} - x_{y0}} 100\%,$$

или

$$\sigma_{max} = \frac{x_{0max} - x_{y0}}{x_{y0}} 100\%.$$

Крутизна определяет поведение системы в переходном режиме и характеризует быстроту реакции системы на внешнее возмущение. Крутизна может быть охарактеризована временем t, в течение которого система, находящаяся под влиянием скачкообразного воздействия, впервые достигает согласованного положения. Чем меньше t, определяющее крутизну характеристики процесса, тем больше ускорение при разгоне системы и тем, следовательно, быстрее реагирует система на внешнее возмущение.

Колебательность системы определяется числом колебаний, возникающих в системе при переходном процессе. Практически определение колебательности системы осуществляется по кривой переходного процесса или частотными методами по величине так называемого показателя колебательности.

Ошибка регулирования $\Delta 0$ — разность между требуемым и действительным значением регулируемой величины. Ошибка регулирования равна сумме установившейся ошибки и динамической ошибки. В удовлетворительно работающей системе ошибка регулирования является ограниченной величиной. По величине допустимой ошибки регулирования можно при известном уровне входного сигнала судить о изменении коэффициента усиления контролируемого звена или системы.

Современные методы анализа переходных режимов и установившихся периодических процессов базируются на осциллографировании этих процессов. Методика осциллографирования затрагивает широкий круг вопросов [27, 37]. Здесь будут приведены только начальные рекомен-

дации по подбору, включению и градуировке гальванометров (шлейфов).

Различные физические процессы, предназначенные для регистрации и измерения, преобразуются при помощи датчиков в унифицированные электрические параметры — ток или напряжение. В качестве датчиков измерения скорости движения и ускорения могут быть использованы тахогенераторы, а для измерения давления в гидросистемах станков — индуктивные манометры или какие-то другие датчики. В фазовой системе ЧПУ в качестве датчиков контроля скорости и ускорения могут быть использованы тахогенераторы типа ТД-103, стационарно смонтированные на приводах станка. Электрические величины, выходящие из датчиков и несущие в себе функциональную зависимость измеряемых величин, поступают в преобразующее устройство шлейфного осциллографа, которое при помощи чувствительных элементов прибора — гальванометра и оптической системы преобразует каждую измеряемую величину в пропорциональную ординату записи. Регистрирующее устройство прибора развертывает изменение измеряемых величин по времени. В качестве чувствительных элементов в светолучевых осциллографах применяют рамочные гальванометры. Такие гальванометры построены по принципу магнитоэлектрических приборов: рамка гальванометра вращается в поле постоянного магнита, и угол отклонения ее линейно пропорционален величине протекающего тока. Для демпфирования рамки чувствительных гальванометров помещают в специальное масло. Частота собственных колебаний у гальванометров типовых осциллографов лежит в пределах от 20 до 6500 Гц. Переходные и периодические процессы, анализируемые при наладке приводов станков с ЧПУ, длятся обычно не менее 0,01 с, поэтому быстродействия гальванометров оказывается достаточным для регистрации этих процессов. Осциллографы обеспечивают четкую запись на фотобумаге или фотопленке исследуемых процессов при скорости движения светового луча («зайчика») осциллографа до 10 м/с с частотой до 300 Гц. Скорость светового луча определяется по формуле

$$v = 2\pi f S,$$

где v — скорость в мм/с;
f — частота регулируемого процесса в Гц;
S — амплитуда записи в мм.

Подбор гальванометров производится по закону Ома для постоянного тока. При выборе гальванометров для измерения напряжения рекомендуется выбирать гальванометр по возможности более грубый с учетом того, что дополнительно к нему будут подключены добавочные сопротивления.

Рассмотрим пример подбора гальванометра. Максимальное значение контролируемого напряжения $v_{max} = 115$ В. У осциллографа К-12-22 выбираем гальванометр типа IV, у которого чувствительность $a = 33{,}2$ мм/мА, максимально допустимый ток $I_{max} = 2$ мА, предельная частота измерений 30 Гц, сопротивление $22 \pm 3{,}5$ Ом. Принимаем максимальное отклонение луча (в одну сторону) $S = 40$ мм; тогда

$$i_p = \frac{S}{a} = \frac{40}{33{,}2} \approx 1{,}2\,мА,$$

где i_p — ток, протекающий по гальванометру.

Добавочное сопротивление к шлейфу

$$R_д = \frac{v_{max}}{i_p} = \frac{115 \cdot 10^3}{1{,}2} \approx 95{,}8 \text{ кОм}.$$

Во избежание перегорания гальванометра часть добавочного сопротивления должна представлять собой невыключаемую часть внешнего сопротивления:

$$R_{д.в} = \frac{v_{max}}{I_{max}} = \frac{115 \cdot 10^3}{2} \approx 58 \text{ кОм}.$$

Небольшие токи (до 10 А) удобно осциллографировать, пользуясь набором шунтов и переключателей, имеющихся в приставке к осциллографу, или в дополнительных устройствах.

При больших токах (порядка сотен ампер) приходится использовать стандартные шунты на 45—75 мВ из схем приборов.

Выбирая гальванометр, следует учитывать знакопеременный сигнал и неполное использование шунтов по току, необходимо учитывать также и напряжение, имеющееся на шунте, которое составляет обычно не более 10—15 мВ. Достаточное отклонение при столь малом напряжении могут дать только гальванометры высокой чувствительности. При питании гальванометров от шунтов очень сказывается сопротивление подводящих проводов, что необходимо учитывать при более точных измерениях.

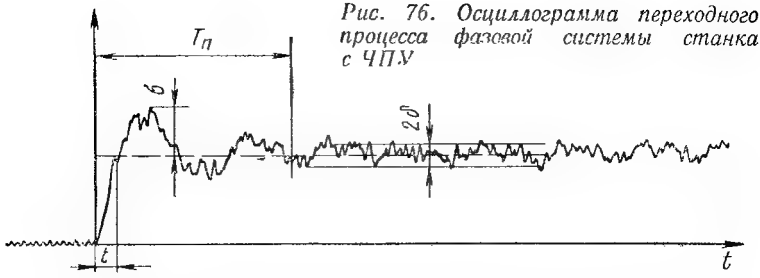


Рис. 76. Осциллограмма переходного процесса фазовой системы станка с ЧПУ

Для потенциального отделения измеряемого тока от гальванометра осциллографа и для увеличения сигнала можно применять трансформаторы или усилители, подключаемые к шунтам. При осциллографировании переменных напряжений добавочное сопротивление $R_{д.в}$ выбирают с учетом того, что отклонение гальванометра будет определяться не действующим, а двойным амплитудным значением измеряемого напряжения.

Рабочим режимом привода станка с ЧПУ является плавное нарастание нагрузки при врезании и скачкообразное изменение скорости привода при холостых переходах из одной зоны резания в другую. Поэтому одной из основных задач системы управления приводами станков с ЧПУ является поддержание постоянной скорости при изменении нагрузки, малое динамическое падение скорости и малое время для восстановления скорости.

На рис. 76 представлена осциллограмма переходного процесса при проверке работоспособности станка при скачкообразном изменении управляющего сигнала, поступающего от рассмотренной ранее установки (см. рис. 74). Характерными для данной осциллограммы являются: время регулирования $T_п = 0{,}33$ с, максимальное перерегулирование — $\sigma_{max} = 30\%$, крутизна $t = 0{,}025$ с, колебательность 3 и ошибка регулирования $\delta = 7\%$. Из рассмотренной осциллограммы видно, что процесс регулирования в системе станка при исправной работе соответствует средним показателям качества.

§ 4. СПЕЦИАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ И НАЛАДКИ УЗЛОВ И БЛОКОВ ВНЕ СТАНКА

Немаловажное значение при эксплуатации станков с ЧПУ имеет надежная работа электронной схемы станка и взаимозаменяемость электронных блоков, а также и других узлов

и блоков станка. Поэтому при обслуживании таких станков необходимо иметь достаточное количество резервных блоков и узлов, чтобы устранить наладочные работы на станке и тем самым сократить потери времени при восстановлении систем ЧПУ. Но при этом необходимо иметь или целиком повторенную систему ЧПУ, или специализированные наладочные и испытательные стенды, позволяющие производить наладку и регулировку узлов и блоков вне системы станка.

Наладка и испытания элементов, узлов и блоков систем ЧПУ содержат в себе операции подрегулировки или настройки. Нельзя изменить данные, например, полупроводникового устройства, так как все элементы, влияющие на характеристику, например, полупроводникового транзистора, закрыты герметическим корпусом. Но, очевидно, можно изменить характеристику такого элемента системы, как электромеханический преобразователь, у которого изменением натяга пружин или мембран можно изменить тяговую характеристику.

К общим вопросам подготовки и проведения наладочных и испытательных работ по узлам и блокам аппаратуры систем ЧПУ можно отнести подбор измерительных приборов, внешний осмотр, проверку работоспособности, контрольные измерения и снятие характеристик.

Для испытания элементов, узлов и блоков систем ЧПУ в лабораториях исследовательских институтов и крупных заводов обычно применяют специальные контрольные устройства и стенды. Разрабатываются компактные переносные устройства для испытания и настройки узлов и блоков систем ЧПУ вне станков. По мере появления таких устройств на предприятиях, эксплуатирующих станки с системами ЧПУ, наладчики должны их осваивать и применять в своей практической работе. В ходе испытаний элементов, узлов и блоков аппаратуры ЧПУ необходимо понимание ее основных свойств, без чего нельзя обеспечить качественную режимную наладку этих устройств. Освоение методики испытаний поможет также обеспечить квалифицированное профилактическое обслуживание новых видов оборудования и облегчить отыскание возможных повреждений в схемах систем числового программного управления. При введении в действие систем ЧПУ с электронными блоками проверяется их пригодность и подвергаются контролю общие характеристики блоков и отдельных элементов. Однако контроль отдельных эле-

ментов во многих случаях недостаточен для настройки рабочих режимов системы ЧПУ, отыскания повреждений, подбора резервных элементов и проверки заводских технических данных. Необходимы также знания приемов испытания и снятия характеристик с электронной аппаратуры.

В большинстве электронных схем ЧПУ применяются полупроводниковые приборы. Схемы с полупроводниковыми элементами собираются путем пайки, и отключение отдельных элементов при проверке можно считать нецелесообразным. Сопротивления и емкости, не отсоединенные от схемы, измеряют обычными методами, однако наличие общих цепей с полупроводниковыми приборами (транзисторами, диодами), вносит существенные затруднения. Во время измерения сопротивлений подключение прибора должно производиться таким образом, чтобы полярность источника питания была встречной по отношению к проводящим цепям транзистора или диода и чтобы величина напряжения была значительно ниже допустимого для них обратного напряжения. Если параллельно сопротивлению подключена емкость, то отсчет должен производиться после того, как закончится процесс зарядки конденсатора. Измерение емкости, включенной параллельно сопротивлению, можно производить методом вольтметра-амперметра с последующим учетом активной составляющей тока, проходящего через сопротивление. Более простым является измерение с помощью моста, у которого параллельно варьируемой емкости подключено сопротивление. При контроле электронных схем, имеющих радиолампы, наиболее показательной является величина напряжения на ее электродах, а в цепях с полупроводниковыми приборами важно знать соотношения токов. Без разрыва цепей величины токов могут быть определены только расчетным путем по данным измерения напряжений на известных установочных сопротивлениях. В тех случаях, когда для измерения тока приходится включать амперметр, распаивать схему рекомендуется не непосредственно у полупроводникового прибора, а в цепях, удаленных от него, во избежание излишнего нагрева полупроводникового элемента. Собственное сопротивление миллиамперметра иногда искажает соотношение величин в контуре с транзистором, при этом измерении можно включить в контролируемую цепь малоомный шунт и определить падение напряжения на нем с помощью микроамперметра.

В общем случае программа наладки и испытания электронных систем станков с ЧПУ включает в себя следующие элементы работ.

1. Внешний осмотр.

2. Проверку правильности включения в схеме элементов и проверку их монтажа.

3. Испытание изоляции на электрическую прочность и измерение сопротивления изоляции.

4. Измерение величин и формы напряжений и токов в элементах электронной схемы.

5. Снятие рабочих характеристик (коэффициента усиления, искажения сигнала, фронта сигналов и др.).

6. Контрольную нагрузку схемы на исполнительный элемент или его эквивалент.

7. Запись результатов измерений и проведенного испытания в специальную карту.

Если в процессе испытаний выявлены отклонения от требуемых параметров, превышающих допустимые значения, то необходимо выявить причину возникшего отклонения и устранить неисправность.

Как уже говорилось выше, наиболее целесообразным методом наладки и испытания электронных блоков системы с ЧПУ является производство этих работ вне станка на специальных стендах.

На рис. 77 показан стенд для наладки электронных блоков станков с фазовой системой ЧПУ. В верхней части стенда установлен на подставке для испытания электромеханический преобразователь.

Стенд позволяет контролировать токи в обмотках электромеханического преобразователя; максимальное перемещение сердечника ЭМП, отсюда и линейность этого перемещения; минимальный уровень сигнала, при котором сохраняется работоспособность блока; работу фазового дискриминатора; порог срабатывания реле уровня сигнала считывания. Для оценки прохождения сигнала по элементам блока рекомендуется использовать электронный осциллограф с длительным послесвечением.

Функциональная схема стенда приведена на рис. 78. Стенд имеет генератор *5*, собранный по схеме *LC*-автогенератора, вырабатывающий синусоидальный сигнал с частотой 250 Гц. Нагрузкой автогенератора служит фазовращатель *7*, который состоит из двух последовательно включенных вращающихся трансформаторов; один из них служит для грубого изменения фазового сдвига, дру-

Рис. 77. Стенд для наладки электронных блоков фазовой системы ЧПУ

гой для более точного. Сигналы с фазовращателя поступают в электронный блок системы ЧПУ *11*. Питание осуществляется блоком *9*. Для изменения величины сигнала в стенде предусмотрен делитель *6*, который состоит из ступенчатого и плавного делителя, позволяющего изменять входной сигнал на электронный блок от 0 до 15 мВ. Для контроля этого напряжения в стенде смонтирован вольтметр *8*, собранный на полупроводниковых приборах, который контролирует не только входной сигнал, но может также контролировать сигналы и в других цепях, в частности сигнал с фазового дискриминатора. В качестве нагрузки электронного блока используется электромеханический преобразователь, который подключается к стенду или вмонтирован в стенд ЭМП, позволяющий проверять блок без подключения преобразователя. Для контроля разбаланса токов нагрузки в стенде смонтированы два амперметра *3* и *4*. Для контроля реле уровня сигнала считывания электронного блока предусмотрено

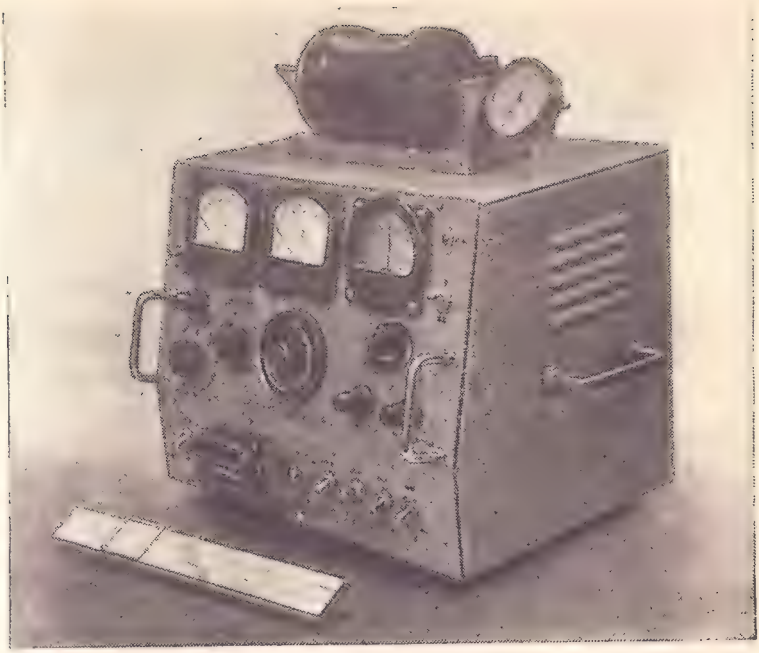


Рис. 77. Стенд для наладки электронных блоков фазовой системы ЧПУ

гой для более точного. Сигналы с фазовращателя поступают в электронный блок системы ЧПУ *11*. Питание осуществляется блоком *9*. Для изменения величины сигнала в стенде предусмотрен делитель *6*, который состоит из ступенчатого и плавного делителя, позволяющего изменять входной сигнал на электронный блок от 0 до 15 мВ. Для контроля этого напряжения в стенде смонтирован вольтметр *8*, собранный на полупроводниковых приборах, который контролирует не только входной сигнал, но может также контролировать сигналы и в других цепях, в частности сигнал с фазового дискриминатора. В качестве нагрузки электронного блока используется электромеханический преобразователь, который подключается к стенду или вмонтирован в стенд ЭМП, позволяющий проверять блок без подключения преобразователя. Для контроля разбаланса токов нагрузки в стенде смонтированы два амперметра *3* и *4*. Для контроля реле уровня сигнала считывания электронного блока предусмотрено

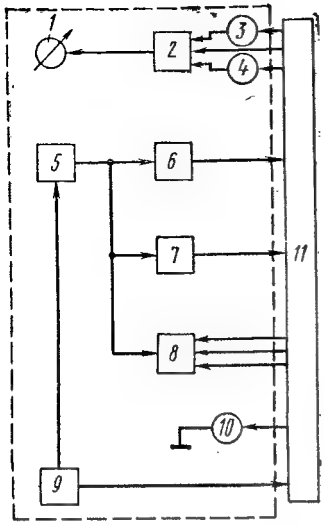


Рис. 78. Функциональная схема стенда

устройство со световой сигнализацией *10* о времени срабатывания реле. Для снятия характеристики электромеханического преобразователя *2* на стенде смонтирована специальная подставка с индикатором перемещения *1*, с помощью которого определяется перемещение сердечника преобразователя. Принципиальная схема стенда показана на рис. 79. Стенд генерирует два сигнала синусоидальной формы сдвигаемых один относительно другого, т. е., так же как в системе станка, в стенде предусмотрены опорный и управляющий сигналы.

Величина рассогласования задается с помощью фазовращателя, который является аналогом программы в станке с ЧПУ. Величина рассогласования имитирует скорость движения и величину линейного перемещения рабочих органов станка.

Другой разновидностью стенда для наладки и ремонта электронных панелей и проверки шаговых двигателей является наладочный стенд (рис. 80), функциональная схема которого изображена на рис. 81. Стенд дает возможность проверять работоспособность и чувствительность входных усилителей электронных панелей управления импульсно-шаговой системы ЧПУ. С помощью стенда можно настраивать эти блоки при их ремонте вне станка. Для проверки панелей в стенде предусмотрено ступенчатое и плавное изменение входного сигнала, режим «измерение чувствительности». Для проверки и наладки электронных панелей ручного управления предусмотрено ступенчатое изменение частоты сигнала (от 2 до 1000 Гц), на этих же частотах проверяется работоспособность шагового двигателя.

Здесь же в стенде предусмотрено устройство автоматического реверсирования шагового двигателя с программированием времени работы и реверсирования.

Стенд состоит из генератора несущей частоты *2*, со-

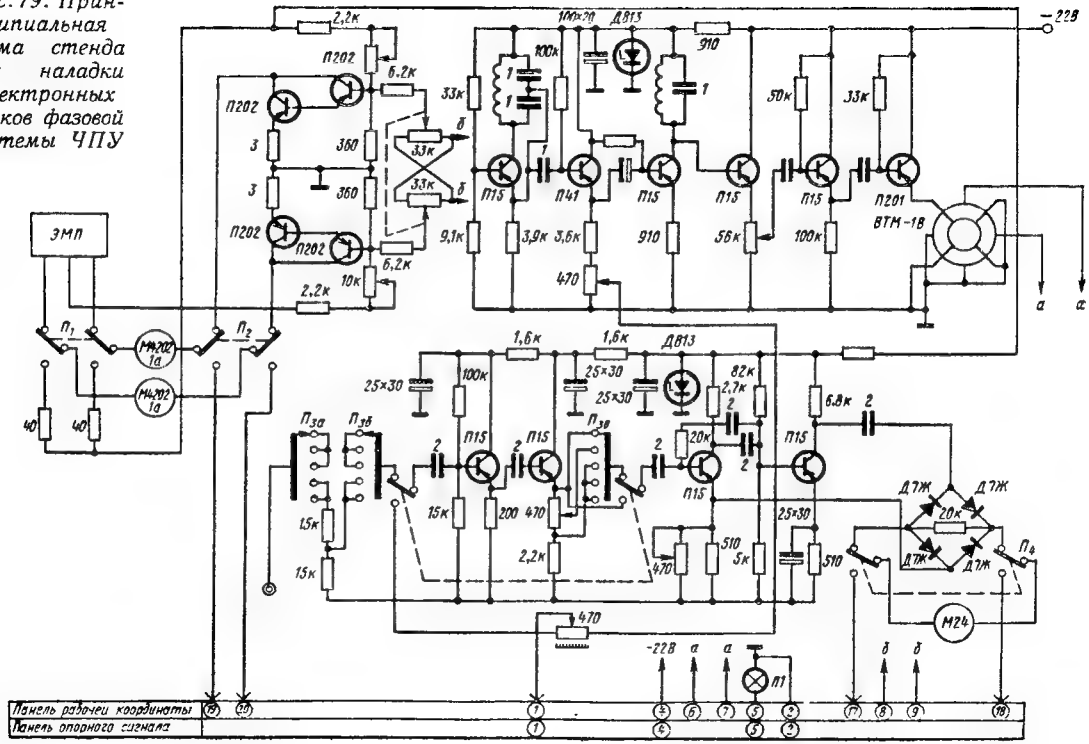


Рис. 79. Принципиальная схема стенда для наладки электронных блоков фазовой системы ЧПУ

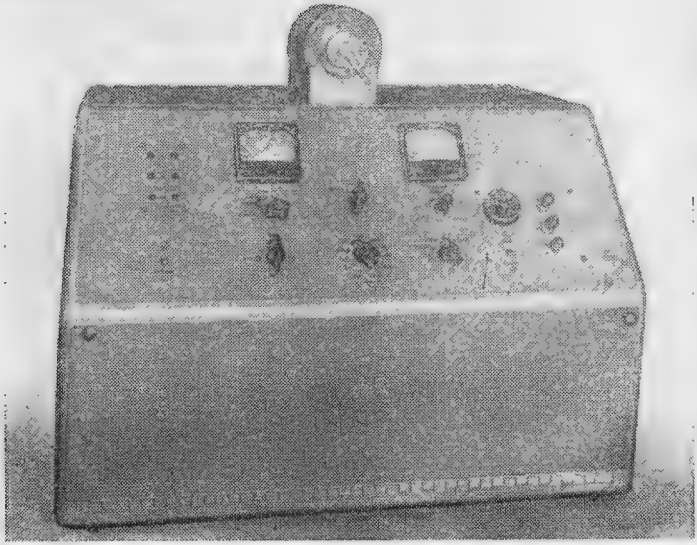


Рис. 80. Стенд для наладки электронных блоков и шаговых двигателей

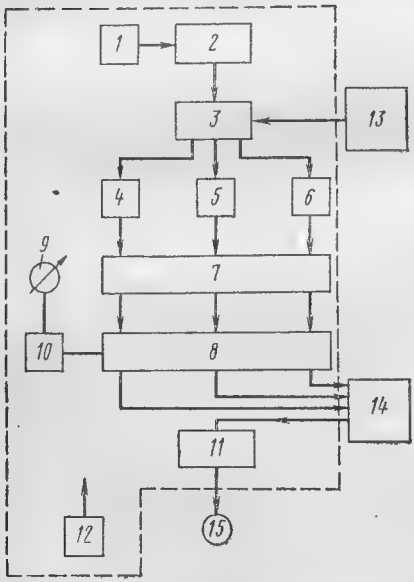


Рис. 81. Функциональная схема стенда:

1 — ручной регулятор частоты; *2* —генератор несущей частоты; *3* — расширитель; *4, 5, 6* — модуляторы; *7*—блок ступенчатого переключателя частоты; *8*—блок изменения уровня входных сигналов; *9* — индикатор чувствительности; *10* — регулятор изменения чувствительности; *11*— блок реверса шагового двигателя; *12* — блок питания; *13*—электронный блок системы ЧПУ; *14* — электронный блок ручного управления системы; *15* — шаговый двигатель.

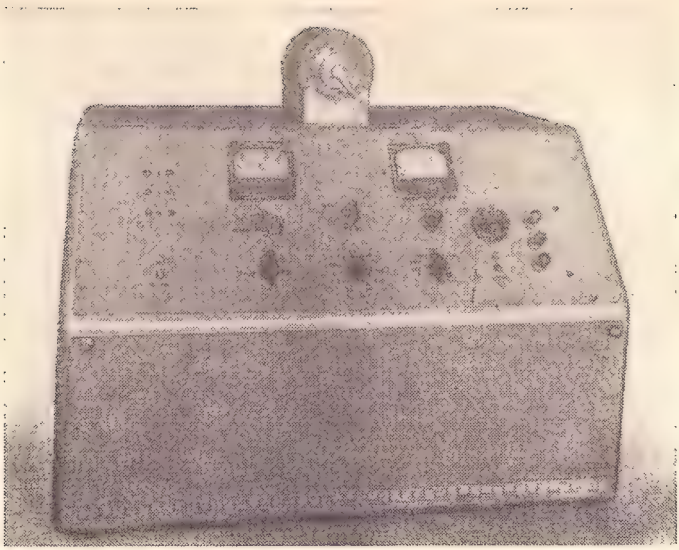


Рис. 80. Стенд для наладки электронных блоков и шаговых двигателей

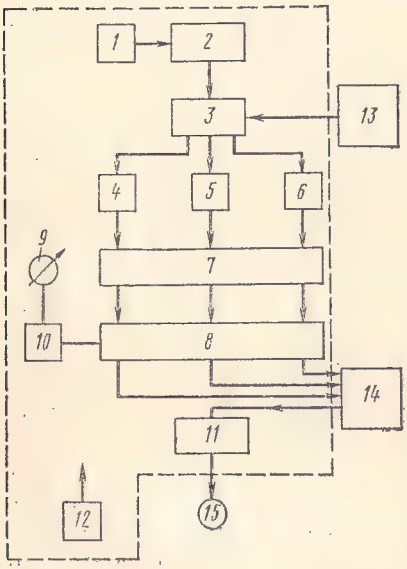


Рис. 81. Функциональная схема стенда:

1 — ручной регулятор частоты; *2* — генератор несущей частоты; *3* — расширитель; *4, 5, 6* — модуляторы; *7* — блок ступенчатого переключателя частоты; *8* — блок изменения уровня входных сигналов; *9* — индикатор чувствительности; *10* — регулятор изменения чувствительности; *11* — блок реверса шагового двигателя; *12* — блок питания; *13* — электронный блок системы ЧПУ; *14* — электронный блок ручного управления системы; *15* — шаговый двигатель.

бранного по схеме блокинг-генератора с частотой 2500 Гц, у которого предусмотрена ручная подстройка частоты *1*. Сигналы с генератора поступают на расширитель *3*, собранный на эмиттерных повторителях и служащий для разделения сигнала от генератора по трем каналам системы. Сигналы с эмиттерных повторителей поступают на модуляторы, *4*, *5* и *6*, которые управляются от панели ручного управления *14*. В панели ручного управления имеются свой собственный генератор и кольцевые коммутаторы, служащие для распределения сигналов управления по обмоткам шагового двигателя.

Генератор панели ручного управления собран на мультивибраторах. Частота может меняться с помощью ступенчатого переключателя *7* в следующем диапазоне частот: 2, 30, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 Гц.

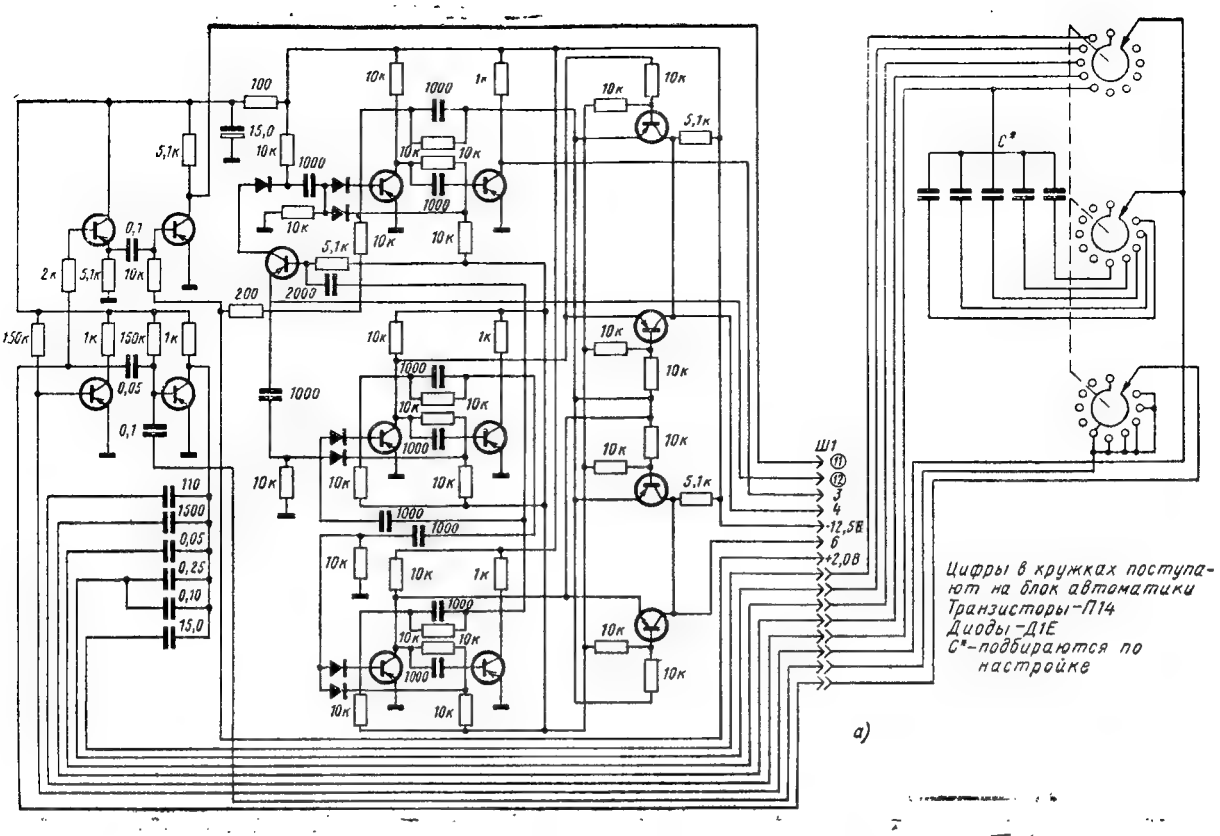
Для изменения величины входного сигнала в электронные панели в стенде предусмотрен ступенчатый переключатель изменения уровня входного сигнала *8*, который изменяет сигнал в следующем соотношении: 1 : 10, 1 : 50, 1 : 100, 1 : 500 и 1 : 1000, а с помощью регулятора чувствительности входа *10* перекрывается изменение уровня сигнала в каждом из этих поддиапазонов. Питание осуществляется блоком *12*.

Для контроля величины выходного сигнала стенда предусмотрен измеритель чувствительности *9*, который измеряет величину сигнала в абсолютных значениях.

Шаговый двигатель *15* является нагрузкой выходных элементов электронной панели, поэтому в стенде предусмотрено его подключение. В стенде предусмотрен специальный блок *11*, позволяющий проверить шаговый двигатель в любом режиме (реверс, изменение скорости, изменение нагрузки и др.).

Применение в комплексе со стендом других измерительных приборов (осциллографа, милливольтметра, миллиамперметров и др.) позволяет полностью снять характеристики с электронных блоков *13* системы ЧПУ. Принципиальная схема стенда изображена на рис. 82.

Для испытания и проверки работы электромеханических преобразователей (ЭМП), управляющих перемещением золотников, необходимо контролировать значения ряда параметров, особенно те, которые влияют на их характеристику. Такими параметрами являются усилие перемещения подвижного элемента (сердечника), быстродействие, чувствительность, линейность характеристики



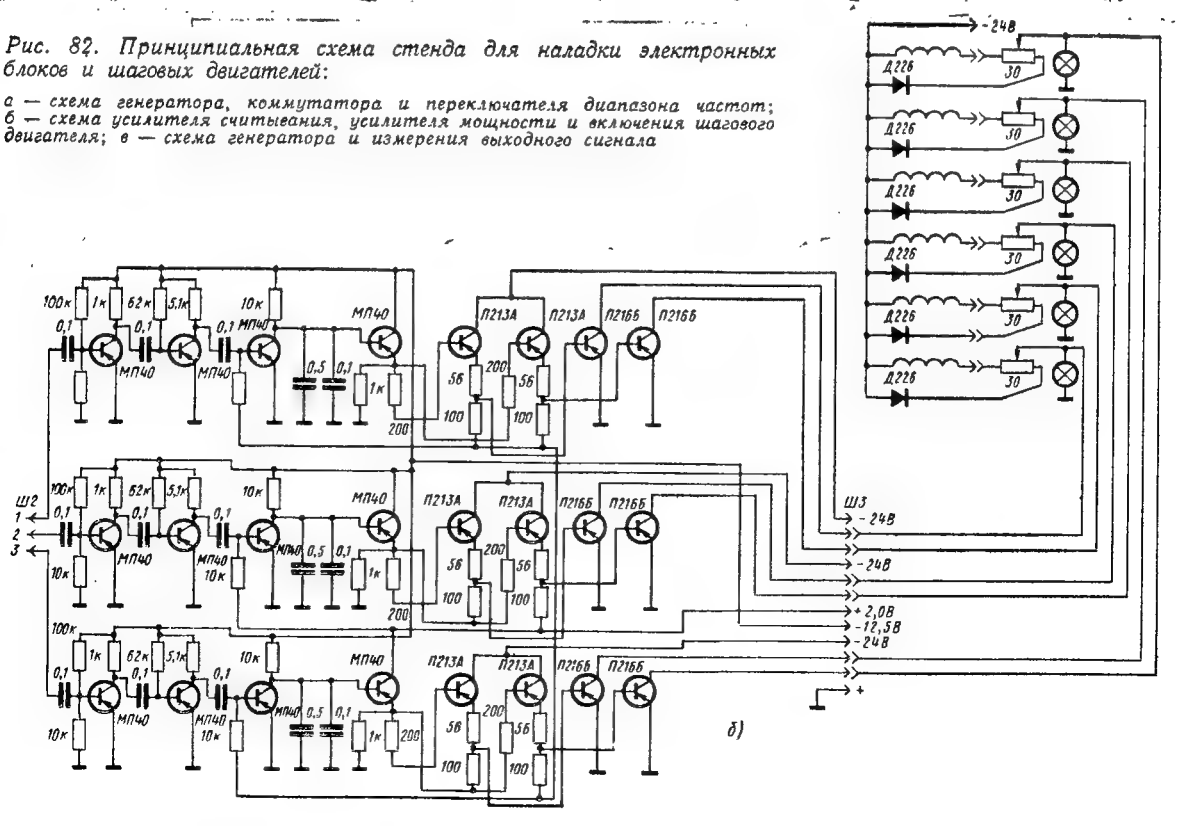


Рис. 82. Принципиальная схема стенда для наладки электронных блоков и шаговых двигателей:

а — схема генератора, коммутатора и переключателя диапазона частот; б — схема усилителя считывания, усилителя мощности и включения шагового двигателя; в — схема генератора и измерения выходного сигнала

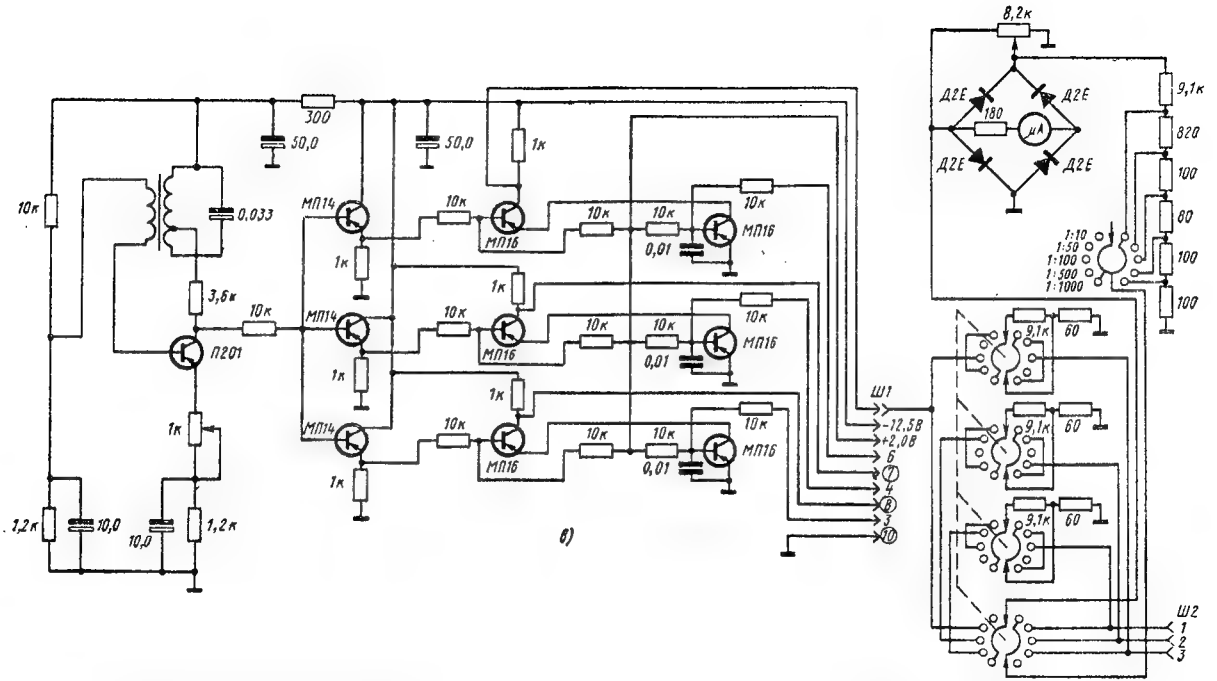


Рис. 82. Принципиальная схема стенда для наладки электронных блоков и шаговых двигателей
б — схема генератора и измерения выходного сигнала

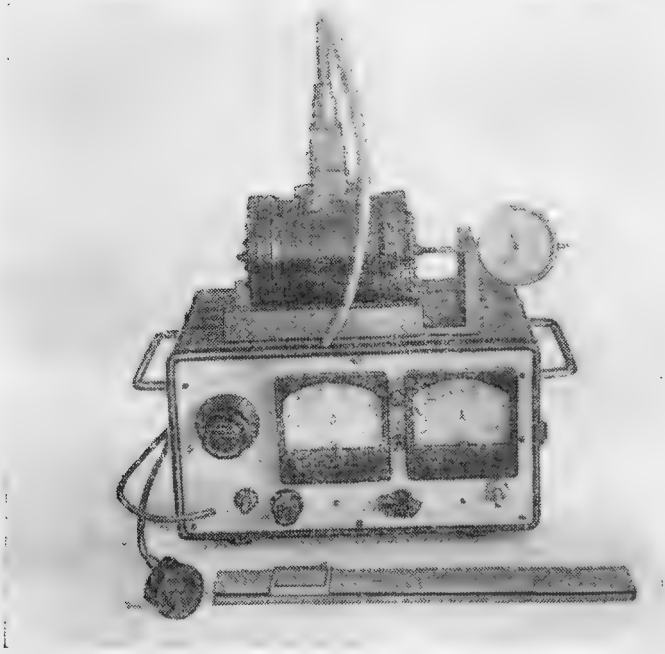


Рис. 83. Стенд для наладки электромеханического преобразователя

$S = f(i)$ и гистерезис. Снять эти параметры непосредственно на станке трудно, а подчас и невозможно. Поэтому для снятия характеристики ЭМП вне станка необходимо иметь наладочные стенды, позволяющие проводить испытания и проверку электромеханического узла. Внешний вид такого стенда изображен на рис. 83. Принципиальная схема стенда показана на рис. 84. Электрическая схема состоит из стабилизированного и регулируемого источника питания, который собран на транзисторе *T1*. Регулирование напряжения осуществляется с помощью потенциометра *R2*. Вторым элементом стенда является балансный усилитель, собранный на составных транзисторах *T2*, *T3* и *T4*, *T5* (для получения большого входного и малого выходного сопротивлений). Амперметры A_1 и A_2 служат для контроля токов, протекающих по обмоткам электромеханического преобразователя (ЭМП). Делители напряжения, собранные на резисторах *R5*, *R6*, *R8* и *R4*, *R12*, *R13*, служат для выравнивания токов в цепях балансного

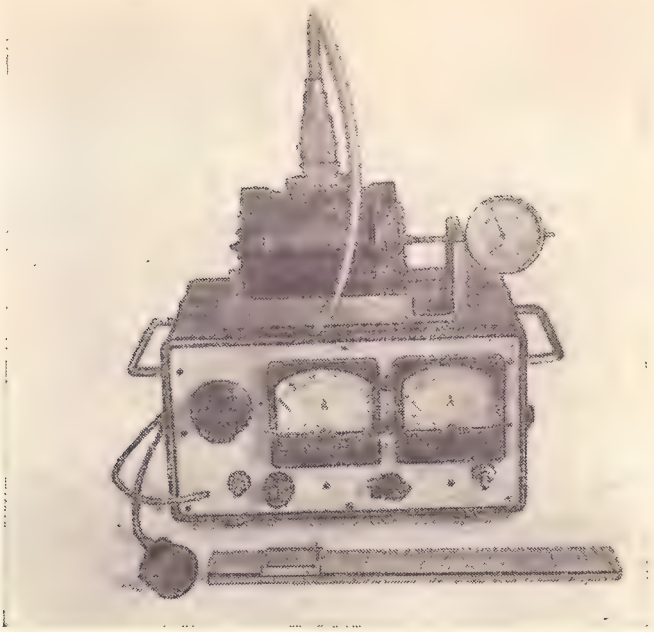


Рис. 83. Стенд для наладки электромеханического преобразователя

$S = f(i)$ и гистерезис. Снять эти параметры непосредственно на станке трудно, а подчас и невозможно. Поэтому для снятия характеристики ЭМП вне станка необходимо иметь наладочные стенды, позволяющие проводить испытания и проверку электромеханического узла. Внешний вид такого стенда изображен на рис. 83. Принципиальная схема стенда показана на рис. 84. Электрическая схема состоит из стабилизированного и регулируемого источника питания, который собран на транзисторе *T1*. Регулирование напряжения осуществляется с помощью потенциометра *R*2. Вторым элементом стенда является балансный усилитель, собранный на составных транзисторах *T2*, *T3* и *T4*, *T5* (для получения большого входного и малого выходного сопротивлений). Амперметры A_1 и A_2 служат для контроля токов, протекающих по обмоткам электромеханического преобразователя (ЭМП). Делители напряжения, собранные на резисторах *R5*, *R6*, *R8* и *R4*, *R12*, *R13*, служат для выравнивания токов в цепях балансного

усилителя, возникающих при неодинаковых характеристиках составных транзисторов.

Напомним принцип работы электромеханического преобразователя. Якорь электромагнита подвешен на двух достаточно жестких мембранах и жестко связан с управляющим золотником; жесткость мембран 150—200 кгс/см. Обычно в обмотки преобразователя для линеаризации характеристик подаются какие-то средние значения токов, равные по величине. При неравенстве токов якорь отклоняется в ту или другую сторону, в первом приближении пропорционально разности токов, протекающих по обмоткам преобразователя. Для регулирования токов в обмотках электромагнита, при проверке и наладке в стенде предусмотрен регулятор-потенциометр *R10*. Сопротивление *R11* играет роль токоограничивающего резистора.

Наибольший интерес при снятии характеристик ЭМП представляет вопрос о том, какую жесткость мембран необходимо выбирать, чтобы гидравлическая система была устойчивой, и от каких факторов зависит предельное значение упругости мембран. Из практики известно, что при ослаблении жесткости мембран возникают автоколебания

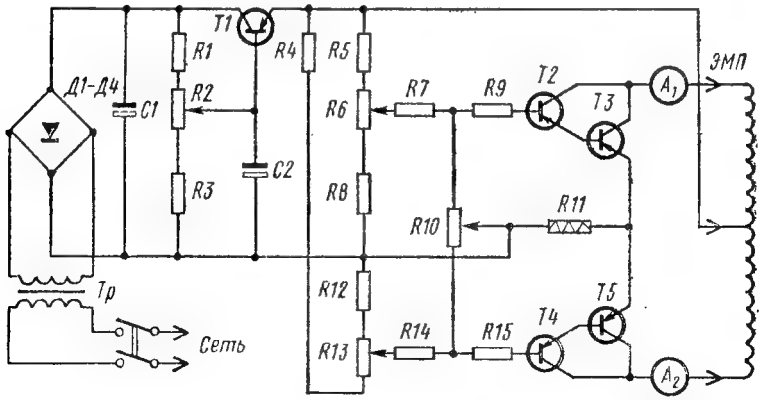


Рис. 84. Принципиальная схема стенда для наладки электромеханического преобразователя:

T1 (П210), *T2* (П217), *T3* (П210), *T4* (П217), *T5* (П210) — транзисторы; *Д1—Д4* (Д303) — диоды; *R1* (30 Ом), *R2* (680 Ом, ППЗ), *R3* (300 Ом), *R4* (510 Ом), *R5* (510 Ом), *R6* (680 Ом, ППЗ), *R7* (1 кОм), *R8* (100 Ом), *R9* (2,2 кОм), *R10* (350 Ом), *R11* (0,5 Ом, проволочное), *R12* (100 Ом), *R13* (680 Ом, ППЗ), *R14* (1 кОм) — резисторы; *C1*, *C2* (500 мкФ) — конденсаторы; A_1, A_2 — амперметры типа М-4202 на 1 А; *Тр* — трансформатор 50 Вт, 220/25 В

высокой частоты, при увеличении жесткости мембран меняется быстродействие и чувствительность преобразователя, при вытягивании мембран появляется гистерезис. Все эти факторы требуют очень внимательного подхода при настройке и проверке наладчиками электромеханических преобразователей.

Для снятия механических характеристик ЭМП с помощью стенда поступают следующим образом. Устанавливают преобразователь в специальную подставку,в которой установлен индикатор линейного перемещения, связанный с сердечником ЭМП. Изменяя токи в обмотках ЭМП, с помощью сопротивлений *R6* и *R13* добиваются равенства токов, причем при этом отклонение сердечника должно быть равно нулю. Затем, изменяя ток в одном из плеч усилителя с помощью потенциометра *R10* через кратные интервалы тока, фиксируют линейное перемещение сердечника, одновременно следя за тем, чтобы сумма токов в обоих плечах была равна сумме токов при нулевом отклонении сердечника. Затем такие же измерения производят при отклонении сердечника в другую сторону. По данным измерений строится механическая характеристика ЭМП и дается оценка его параметров. Если в процессе испытаний выявлены отклонения от требуемых параметров, превышающие допустимые значения, то выясняют причины возникающего отклонения и затем их устраняют; например, нелинейность электромеханической характеристики (т. е. зависимость перемещения сердечника электромеханического преобразователя будет не пропорциональна изменению тока в катушках), наличие гистерезиса (его допустимая величина для такого типа ЭМП не должна превышать 2%), завышение токов покоя в катушках ЭМП (в исправном состоянии они должны составлять 150 мА $\pm$ 5%).

Стенд для проверки ЭМП является переносным прибором и может быть использован при проверке преобразователя непосредственно на станке, когда в этом возникает необходимость.

Для тарировки индуктивных датчиков давления типа ДИМ и др., а также для тарировки тензометрических датчиков в лабораторных и производственных условиях может быть использован стенд, схема которого показана на рис. 85. Стенд состоит из следующих агрегатов: бачка *2* емкостью 0,5 *л*, ручного пресса *1*, кранов *6* и датчика давления *3*, контрольного манометра *4* и системы трубопроводов *5*. Рабочая жидкость из бачка заполняет всю систему

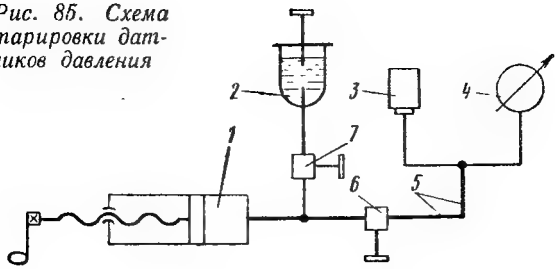


Рис. 85. Схема тарировки датчиков давления

при выведении поршня пресса и открытых кранах. Ручным прессом нагнетается жидкость, при этом кран бачка *7* закрыт, а кран *6* в линии нагнетания открыт. После того как создано необходимое давление прессом, контроль ведется по манометру. Кран *6*, установленный в линии нагнетания, закрывают и производят запись показаний датчика и контрольного манометра. При этом следует учитывать, что установленное давление держится в системе не более 3—5 мин, в зависимости от его величины. Понижение давления производится краном бачка, установленным в линии слива.

При тарировке датчиков, задаваясь различными величинами давления, с помощью стенда записывают их на ленту осциллографа и по полученным данным строят тарировочный график датчиков. В дальнейшем при измерении давления в гидропередачах станков по тарировочному графику определяют истинные давления в гидросистеме.

Как известно, объемная гидропередача станка с ЧПУ состоит из насоса-генератора гидравлической энергии и гидромотора, преобразующего энергию потока жидкости в механическую энергию вращения выходного вала. Поэтому обычно производится раздельное испытание насоса и гидромотора, а затем исследуется вся гидропередача. Стендовые исследования объемной гидропередачи включают в себя определение как надежности отдельных узлов гидромашин, так и всей системы, снятие внешних характеристик гидромашин и гидропередачи, исследование пусковых свойств машин, определение глубины регулирования, а также минимальной и максимальной устойчивой скорости при различных нагрузках.

Для определения всех параметров, характеризующих режим работы гидропередачи или гидронасосов (гидромоторов), стенды оборудуются контрольно-измерительной

аппаратурой и приборами визуального отсчета контролируемой величины, а также для записи процессов стенды оборудуются самописцами или осциллографами. Выбор контрольно-измерительной аппаратуры, место ее установки, тип и точность приборов зависят от задачи испытаний и определяются программой и методикой испытаний.

Принципиальная схема стенда для испытания насосов и гидромоторов, а также всей гидросистемы показана на рис. 86. Насос *1* с регулируемой производительностью по трубопроводу *15* подает жидкость в гидромотор *6*; из гидромотора рабочая жидкость по трубопроводу *15* возвращается в насос. Вал гидромотора соединяется с тормозом *7*. В зависимости от нагрузки, создаваемой тормозом на валу гидромотора, изменяют давление в гидросистеме и производят испытание насоса и гидромотора, а также привода при различных режимах. Скорость вращения при объемном регулировании изменяют путем управления производительностью насоса. При нерегулируемом насосе применяют дроссельное регулирование. Защита системы от предельных перегрузок в стенде осуществляется предохранительным клапаном *5*, подключенным к магистрали через обратные клапаны *2*, *3*, *4*, *8* и *9*. Подпиточный насос *11* восполняет утечки системы стенда. Жидкость подается через фильтр *10* и обратные клапаны *4*, *2* и *8* в магистраль. Излишек жидкости через клапан *12* сливается в бак *14*. При засорении фильтра срабатывает клапан *13*. Стенд, выполненный по данной схеме, является универсальным и позволяет всесторонне испытывать гидропередачи. На стенде могут сниматься внешние характеристики насоса, гидромотора и всей гидропередачи. Стендовые испытания являются ответственным этапом при эксплуатации гидромашин, поскольку во время этих испытаний должны быть выявлены и устранены недостатки проведенного ремонта, определены характеристики гидросистемы, надежность и другие показатели работы гидросистемы станка с ЧПУ. Пра-

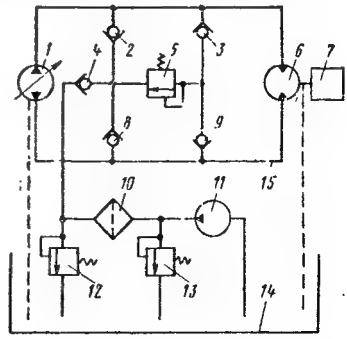


Рис. 86. Принципиальная схема стенда для проверки гидропривода объемного регулирования

вильный выбор тормозной установки часто определяет успешное выполнение программы испытаний. Наиболее универсальными нагрузочными устройствами, позволяющими изменять тормозные и нагрузочные характеристики в широких пределах, являются электрические тормозные устройства, выполненные на генераторах постоянного тока. При снятии характеристик очень важно, чтобы тормозной момент легко регулировался и величина его не изменялась самопроизвольно во время испытаний. При колебаниях тормозного момента снижается точность измерений параметров гидропередачи, характеризующих данный режим.

Снятие характеристик гидропередачи производится при постоянном числе оборотов приводного двигателя на различных ступенях производительности или при постоянной производительности насоса и заключается в определении моментов на валу насоса $M_н$ кГс·м; на валу гидромотора $M_м$ кГс·м; числа оборотов насоса $n_н$ об/мин и гидромотора $n_м$ об/мин. Также производится измерение давления на входе и выходе насоса и гидромотора, расхода жидкости в гидравлической системе и утечек из гидромашин. По измеренным параметрам на валах насоса и гидромотора можно вычислить следующие характеристики:

мощность на валу насоса

$$N_н = \frac{M_н n_н}{975} \text{ кВт};$$

мощность на валу гидромотора

$$N_м = \frac{M_м n_м}{975} \text{ кВт};$$

полный к. п. д. гидропередачи

$$\eta_п = \frac{N_м}{N_н} = \frac{M_м n_м}{M_н n_н},$$

где M — момент на валу гидромашины;

n — числа оборотов на валу гидромашины.

Сравнивая эти характеристики с паспортными данными гидромашин, можно оценить пригодность их в системах управления станками с ЧПУ.

Экспериментальными исследованиями установлено, что динамические свойства систем станков с ЧПУ, имеющих в своем составе гидропередачи, зависят в большей степени от динамических характеристик гидронасосов и гидромо-

торов, чем от остальных элементов системы управления станком. Поэтому при испытаниях на стендах гидромашин станков с ЧПУ необходимо определять и значения динамических свойств гидропривода. Оценка привода по его динамическим свойствам и влияние этих параметров на динамику станка позволяют определять надежность системы станка при использовании в условиях переменной нагрузки. Исследование динамических свойств гидропередачи после ремонта или в процессе эксплуатации позволяет до установки ее на станок оценивать эффективность ее применения или дает возможность рекомендовать пути изменения характеристик для получения большего эффекта.

До последнего времени в технических заданиях на изготовление гидрооборудования требования к надежности не оговаривались совсем или указывалось, что система (или ее агрегаты) должна работать надежно. Каких-либо количественных критериев оценки надежности никто не устанавливал. Это приводило к тому, что на практике появились агрегаты, которые явно не удовлетворяли самым элементарным требованиям надежности [21]. Без указания количественно нормированных требований на гидрооборудование станков с ЧПУ невозможно при его изготовлении и эксплуатации уделить достаточно серьезного внимания вопросам надежности гидросистем станков.

Методика снятия динамических характеристик и определения надежности гидроагрегатов достаточно хорошо изложена в работах [3, 10, 21, 31].

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ СТАНКА ПРИ НАЛИЧИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

При контроле автоматизированных систем во многих случаях недостаточно установления того факта, что контролируемая система вышла из работоспособного состояния. Для восстановления нормальной работоспособности необходимо выявить те ее элементы (узлы, блоки), которые послужили причиной неправильного функционирования объекта контроля. Работоспособность системы ЧПУ — это такое состояние системы, при котором она соответствует всем требованиям, установленным в отношении ее основных параметров. Установить состояние системы можно, определив состояние элементов, узлов или блоков, из которых она состоит, или экспериментально проверив

возможность выполнения системой рабочих функций, т. е. контролируя ее основные характеристики.

При определении работоспособности по состоянию отдельных элементов, блоков и узлов необходимо выполнить комплекс измерительных операций по определению величин электрических параметров элементов и состояния электронных и электрических схем системы. Эти операции предусматривают необходимость измерения угловых и линейных перемещений (выходных величин рабочих органов станка, датчиков обратной связи, электромеханических блоков), величин омических, индуктивных и емкостных сопротивлений, сопротивлений изоляции и других электрических параметров элементов системы, а также установление целостности кинематических и электрических цепей, определение положения управляющих элементов.

Операции по диагностике неисправностей в станках с системами ЧПУ можно выполнять при двух состояниях контролируемой системы: если состояние системы неизвестно и необходимо перед работой или в период работы определить ее состояние или если состояние системы известно, т. е. при выполнении контроля уже установлен факт либо полной потери работоспособности, либо незначительного снижения степени работоспособности и необходимо установить причину — обнаружить появившуюся неисправность. Таким образом, обнаружение неисправностей можно проводить одновременно с определением работоспособности или после установления факта возникновения неисправности в контролируемой системе. Возникновение неисправности в контролируемом узле, блоке, системе характеризуется изменением параметров элементов или изменением величины и формы контрольного сигнала, с помощью которого контролируется система или блок.

Обнаружение неисправностей в системах ЧПУ требует ясного понимания принципов работы системы с полным знанием рабочих характеристик отдельных элементов и умением анализировать факты.

В качестве примера неисправности, возникшей в фазовой системе ЧПУ, рассмотрим отсутствие вибрации (осцилляции) на управляющем золотнике гидросистемы. Отсутствие осцилляции на золотнике возможно из-за обрыва в цепи катушек электромеханического преобразователя или из-за отсутствия переменного напряжения,

поступающего в балансный усилитель мощности, выход которого подается на электромеханический преобразователь. При отсутствии вибрации у золотника момент трогания его из-за наличия сцепления с пленкой масла во времени будет запаздывать при действии на него управляющего сигнала, а следовательно, произойдет сдвиг во времени между сигналами на входе и выходе системы. Отставание во времени определится разностью фаз между сигналом на входе и выходе. При неправильном соотношении фаз в следящих приводах фазового типа (мы рассматриваем фазовую систему ЧПУ) характерным признаком этого недостатка является уменьшение быстродействия и появление неустойчивости работы следящей системы.

Если максимальное значение кривой сигнала выхода наступает позже, чем максимальное значение сигнала на входе, то фазовый сдвиг называется отставанием, или говорят, что выход отстает от входа. В качестве примера на рис. 87 показан фазовый сдвиг на 180° между входным *1* и выходным *2* сигналами. Соотношение фаз двух напряжений может быть измерено несколькими способами, требующими применения светолучевого или электронного осциллографа. Методы измерения фаз рассмотрены в работах [45, 48].

Из рассмотренного примера видно, что для определения появившейся неисправности необходимо проконтролировать не только работу электромеханического узла (золотника с электромеханическим преобразователем), но и определить характер поведения системы ЧПУ. Причем для определения неисправности необязательно знать неисправный элемент, а по характеру поведения системы можно определить эту неисправность.

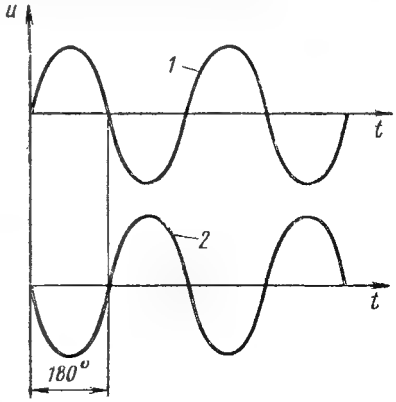


Рис. 87. Фазовый сдвиг с отставанием на 180° между входным и выходными сигналами (u—t)

Необходимо отметить, что зазоры (люфты) в механических передачах отрицательно влияют на устойчивость следящего привода станка с системой ЧПУ, причем это влияние зависит от типа следящего привода. Практика, экспери-

менты и расчеты показывают, что особенно опасны зазоры в кинематике корректирующих цепей (например, редукторе привода тахогенератора) и в редукторах приводов рабочих органов станков. Например, зазор в редукторе тахогенератора станка ФП-7 приводит к автоколебаниям и неустойчивой работе системы станка при работе по программе. Неустойчивость работы привода станка с системой ЧПУ может быть вызвана различными причинами. Наиболее часто встречающимися неисправностями могут служить неправильная настройка отдельных элементов или их разрегулировка в процессе работы. Например, если неправильно настроен золотник, т. е. рабочие щели золотника не имеют нейтрального положения, то через какое-то окно золотника поступает рабочая жидкость в полость гидродвигателя. При отклонении золотника в другую сторону в системе управления появится зона нечувствительности, а это приводит к неустойчивой работе привода. Другой пример; если неправильно настроен усилитель мощности шагового двигателя привода золотника гидроусилителя в станке модели 6Н13-Ф3, то при этом наблюдаются сбои шагового двигателя, приводящие к неустойчивой работе системы станка.

Практика показывает, что основная масса отказов в гидросистемах станков с ЧПУ связана с нарушением герметичности, причем большинство гидроузлов и гидроагрегатов выходят из строя вследствие нарушений внутренней герметичности. Повышение внутренних утечек можно объяснить увеличением зазоров в плунжерных парах гидронасосов и гидродвигателей из-за износа трущихся поверхностей и выхода появившихся зазоров за пределы установленных допусков. Внешняя негерметичность может оказаться следствием выхода из строя уплотнительных элементов, в частности резиновых уплотнительных манжет, а также нарушений стыковых соединений трубопроводов из-за температурных деформаций или вибрации. Если внешняя негерметичность может быть определена просто, по количеству вытекающей рабочей жидкости в единицу времени, то внутренние утечки определить сложнее. Может быть предложен способ для определения внутренних утечек с помощью индукционных манометров и осциллографирования изменения давления. Для этого в магистрали подачи рабочей жидкости устанавливают индукционные манометры типа ДИМ; установку манометров надо производить как в линию нагнетания и

подпитки, так и в линию слива, так как при изменении направления подачи жидкости линии нагнетания и слива поменяются местами. По характеру работы подпиточного насоса и изменению давлений в линии нагнетания и слива, отснятых на ленту осциллографа, можно судить о том, есть ли внутренние утечки в гидросистеме станка.

Задача обнаружения неисправностей в электронных и электрических системах станков с ЧПУ может решаться с помощью инструментальных (приборных) измерений прохождения сигналов по системе и в зависимости от появившейся неисправности поведения системы. Например, для изменения уровня считываемого сигнала с магнитной ленты в системе пульта ПРС-3К, сигнал, пройдя электронные блоки, вызовет нестабильную работу шагового двигателя, т. е. при отработке вводимой информации в систему будут наблюдаться сбои в системе, которые выразятся в потере информации, и рабочие органы станка не придут в заданную программой точку. При обнаружении неисправностей в системах станка с ЧПУ в качестве активного датчика, который бы обнаруживал неисправность в элементах, узлах и блоках электрической и электронных схемах системы станка, можно использовать датчики, установленные на самом станке, например тахогенераторы, вращающиеся трансформаторы, редусины, которые сами вырабатывают сигналы в соответствии с заданной в систему программы, и по деформации этого сигнала можно судить о поведении системы. Например, при набросе скорости в программе, превышающей максимально допустимую величину для системы станка, тахогенератор будет вырабатывать сигнал, тоже превышающий допустимый. По величине этого сигнала можно судить о работоспособности системы. Если сигнал, снимаемый с тахогенератора, заснять на пленку осциллографа, то можно определить и момент появления в системе величины, превышающей допустимую.

В механических передачах станков с ЧПУ подчас из-за незнания величин действующих сил в передачах допускается превышение этих величин. Для определения такого вида неисправностей можно использовать измерения в электрических цепях приводов; например, для станков с тиристорным электроприводом такого вида неисправности характеризуются превышением допустимых токов в цепях якоря электродвигателя при перемещении на холостом ходу, т. е. без обработки детали. Задавая

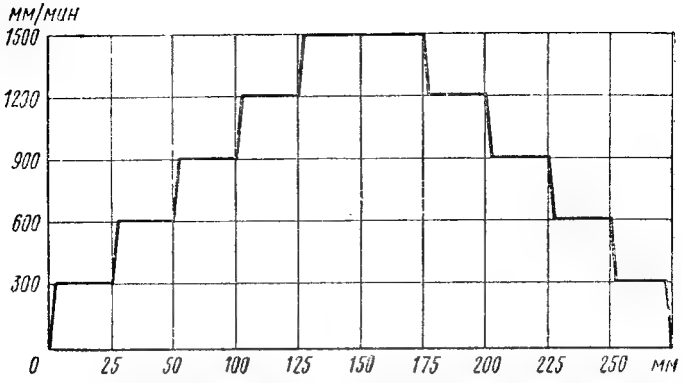


Рис. 88. График изменения скорости и пути рабочего органа по тест-программе, испытания станка

с помощью задатчика перемещения движения рабочему органу станка в ту или другую сторону, измеряют токи в цепи якоря электродвигателя привода и по величине превышения тока относительно номинального значения определяют, в каком направлении действует сила.

Для определения динамических характеристик привода станка с ЧПУ и поведения системы станка нередко вводят в систему станка программу, составленную из так называемых скачков по скорости и ускорению, причем в такую программу закладывают максимально возможные паспортные данные отработки приводом скорости и ускорения. График изменения скорости и ускорения, который закладывается в программу проверки системы станка ФП-7 при снятии динамической характеристики, показан на рис. 88. Проверку следящего привода производят шлейфовым осциллографом. Для определения динамической характеристики по скорости и ускорению вибратор подключают к тахогенератору, так как скорости движения рабочих органов (двигателей привода) пропорциональны напряжению, развиваемому тахогенератором. Часто для определения скорости и ускорения в следящих приводах с тиристорным управлением осциллографируют токи исполнительного двигателя. Обычно до и после осциллографирования на одну и ту же пленку снимают масштабы всех измеряемых величин. Это облегчает обработку осциллограмм и уменьшает возможные ошибки при определении масштабов времени.

Отказы системы управления становятся очевидными, если они вызваны такими неисправностями, как отключение питания, выход из строя предохранителей, короткое замыкание в цепях системы, обрыв управляющей цепи (например, обрыв цепи датчика обратной связи по положению, заклинивание или поломка механических элементов в редукторе или кинематической цепи датчиков обратной связи, обрыв магнитной ленты и т. д.). С другой стороны, знание системы и станка с ЧПУ, проведение профилактических и испытательных работ позволяют определять неисправности по характеру поведения системы, предупреждать отказы и обеспечивать высококачественную и надежную работу систем программного управления и станков.

Глава V

Определение характеристик надежности станочных систем ЧПУ по данным об их отказах

§ 1. СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О РАБОТЕ СТАНКОВ С ЧПУ

Проблема надежности включает в себя весьма широкий круг теоретических и прикладных вопросов, относящихся к различным этапам проектирования, производства и эксплуатации автоматических устройств. Определение истинного уровня надежности автоматических устройств в процессе эксплуатации и выявление наиболее ненадежных узлов, элементов и блоков системы, анализ причин их ненадежной работы являются одной из важнейших задач проблемы надежности. Теоретические методы расчета надежности дают приближенную (ориентировочную) оценку ожидаемого уровня надежности. Более полную и достоверную оценку надежности работы элементов, узлов и блоков можно получить только в результате опыта, реальной эксплуатации.

В настоящее время существует два источника получения информации о надежности работы автоматических систем: статистические данные отказов по результатам реальной эксплуатации или данные при проведении специальных испытаний.

При эксплуатации автоматических систем возникают отказы отдельных элементов, узлов и блоков, сконцентрированные по физическим причинам и происходящие за продолжительный срок эксплуатации систем. Статистические данные об отказах являются, с одной стороны, основой для экспериментального определения надежности системы, а также отдельных ее узлов, блоков и элементов и, с другой стороны, они позволяют конструкторам определить наиболее ненадежные элементы, узлы и блоки и в последующих разработках учесть эти недостатки.

Основной формой учета работы автоматизированной системы, станка или другой аппаратуры является эксплуатационный журнал. Эксплуатационный журнал — дневник, в котором записана вся история «жизни» исследуемого объекта. Подобными объектами могут служить отдельные функциональные устройства с большим количеством элементов, объединенные по физическому признаку действия, например: электронные блоки, гидросистема, механические узлы и т. д., или самостоятельная конструктивная единица, например станок с системой ЧПУ. В эксплуатационный журнал заносится вся информация, которая необходима для полного и всестороннего отчета о процессе эксплуатации устройства. В него заносится информация о качестве выполнения требуемых функций, наблюдающихся срывов функционирования устройства и отказов отдельных его узлов, блоков и элементов, о проводившихся мероприятиях по восстановлению и поддержанию работоспособности и т. п.

Сбор статистических данных по надежности осуществляется с помощью статистического журнала. Характер, объем и полнота записей в журнале определяются назначением устройства, ответственностью выполняемых операций и даже квалификацией обслуживающего персонала. В эксплуатационном журнале при регистрации отказов должны быть записаны следующие сведения:

1. Наработка устройства от предыдущего отказа до момента появления данного отказа; она определяется из учета сменности работы устройства и времени между отказами.

2. Характер выполняемых устройством функций в момент отказа при проверке работоспособности (неустойчивость, колебательность, скачкообразность движения и т. д.).

3. Характеристика отказа и последствия отказа (для станков с ЧПУ — поломка деталей станка, инструмента, брак детали, выход из строя элементов схемы и т. п.).

4. Место отказа и отказавший узел, блок или элемент.

5. Предполагаемая или истинная причина отказа.

6. Длительность устранения отказа (желательно раздельно отмечать время на обнаружение, отыскание и собственно замену отказавшего элемента, блока, узла, подрегулировку, настройку, проверку и испытание системы после устранения отказа).

7. Меры, принятые по устранению причин возникновения отказа.

8. Подпись лица, проводившего работу с устройством.

Одновременно с эксплуатационным журналом на каждое устройство, систему ЧПУ и станок должны быть заведены журналы регламентных, ремонтных (плановых) и испытательных работ.

Под системой станка с ЧПУ понимают совокупность совместно действующих устройств (блоки, узлы и элементы), поэтому, рассматривая вопросы надежности станков с ЧПУ, целесообразно разбить систему на ряд подсистем по физическому признаку действия и далее рассматривать как систему в целом, тогда определение надежности сведется к определению надежности отдельных узлов, блоков и элементов станка с ЧПУ. Наиболее целесообразным разделением по физическому признаку, характерным для станков с системами ЧПУ, будет такое: 1) электронные блоки; 2) пускорегулирующая аппаратура; 3) лентопротяжный механизм; 4) воспроизводящие узлы (магнитные головки, фотосчитыватели); 5) гидросистема; 6) механические узлы; 7) магнитный носитель.

Для того чтобы определить надежность входящих в подсистему элементов, необходимо каждую подсистему разбить на узлы, блоки и элементы второго уровня. Например, для станков с ЧПУ, с указанным разделением на подсистемы первого уровня, подсистему «Электронные блоки» можно разбить на следующие элементы второго уровня: 1) усилители считывания; 2) усилители-ограничители; 3) триггеры; 4) эмиттерные повторители; 5) усилители мощности и т. д.

Если возникает необходимость в более конкретном определении надежности и выделении типовых, стандартных элементов, применяемых в разнообразной аппаратуре, то выделяют изделия, детали, имеющие самостоятельное обозначение на принципиальных схемах, — транзисторы, конденсаторы, резисторы и др.

Гидросистему можно разбить на ряд элементов второго уровня: 1) гидронасосы; 2) гидродвигатели; 3) управляющие золотники; 4) клапаны и т. д.

В каждом конкретном случае для станка любого типа с системой ЧПУ необходимо заранее определить разделение системы на подсистемы, узлы, блоки, элементы и в зависимости от поставленной задачи определить надежность каждой подсистемы, узла, блока или элемента. По

Таблица 2

Ведомость отказов по станкам с фазовой системой ЧПУ в одном календарном периоде

Наименование	Порядковый номер анализа					
	15					
Календарное время	3.03—31.03					
№ станка	107		302		305	
Узлы, блоки и элементы станка и системы ЧПУ	n	τ	n	τ	n	τ
Электронные блоки	1	1,5	1	7,5	—	—
Пускорегулирующая аппаратура	1	8,0	1	7,5	2	16,0
Лентопротяжный механизм	1	8,0	—	—	1	1,0
Воспроизводящие узлы	1	0,5	—	—	—	—
Узлы гидросистемы	—	—	1	4,5	—	—
Механические узлы	—	—	4	38,8	—	—
Магнитная лента	—	—	1	2,0	—	—
Прочие потери	—	—	1	1,8	1	0,5
Всего потерь по отказам	4	18,0	9	50,1	4	17,5
Потери на ППР		32,0		8,0		16,0
Всего потерь		50,0		58,1		33,5

Примечание. n — количество отказов; τ — время восстановления в ч.

Таблица 3

Сводная ведомость отказов по станкам с фазовой системой ЧПУ

Наименование	Порядковый номер анализа					
	1			2		
Количество станков в анализе	14			16		
Календарное время	4.08—2.09			3.09—2.10		
Количество рабочих дней в анализе	22			22		
Количество рабочих часов в анализе	4928,0			5632,0		
Узлы, блоки и элементы станка и системы ЧПУ	*n*	τ	*p*	*n*	τ	*p*
Электронные блоки	9	65,2	1,32	4	36,7	0,65
Пускорегулирующая аппаратура	—	—	—	4	6,1	0,11
Лентопротяжный механизм	5	36,9	0,75	4	10,5	0,20
Воспроизводящие узлы	—	—	—	1	47,0	0,83
Узлы гидросистемы	12	92,6	1,88	7	78,5	1,39
Механические узлы	8	57,1	1,15	7	73,3	1,30
Магнитная лента	6	21,8	0,44	1	6,0	0,11
Прочие потери	7	47,5	0,96	3	11,7	0,20
Всего потерь по отказам	47	323,8	6,5	31	265,8	4,8
Потери на ППР		675,8	13,7		566,0	9,9
Всего потерь		999,6	20,2		831,8	14,7

Примечание. *n* — количество отказов; τ — время восстановления в ч; *p* — потери в %.

материалам эксплуатационного журнала составляется ведомость отказов, которая является исходным материалом для анализа надежности станков с системами ЧПУ.

В качестве примера приведена ведомость отказов по станкам с фазовой системой ЧПУ за один определенный календарный период (табл. 2).

Для определения среднестатистических данных по надежности станков с системами ЧПУ составляется сводная ведомость отказов (табл. 3). Сводная ведомость отказов составляется по материалам ведомости отказов, материал в сводной ведомости можно рекомендовать располагать по узлам, блокам и элементам однотипных станков и систем ЧПУ в соответствии с принятым разделением на подсистемы. Если анализируются узлы, блоки и элементы второго уровня, то таблица и сводная ведомость составляются аналогично.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ

Под надежностью понимают совокупность свойств изделия, определяющих степень его пригодности для использования по назначению и связанных с возможностью появления неисправностей при его эксплуатации [40]. Нарушение работоспособности станка или его элемента называется отказом. К определению отказа следует подходить на основе анализа методов обслуживания и эксплуатации, применяемых для станков данного типа. Кратковременные вмешательства в технологический процесс и подналадку станка, которые регламентированы системой обслуживания (подналадка и замена инструмента, регулирование отдельных механизмов) и связаны с недостаточной степенью совершенства станка, не следует считать отказами станка. Профилактические работы для многих современных станков включены в нормативы технологического и межремонтного обслуживания и не являются отказами, нарушающими нормальную работу станка. Чем выше степень совершенства станка, тем меньше профилактических нарушений работы оборудования. Признаки (критерии) отказов рекомендуется отражать в технических условиях и паспорте на станок.

При эксплуатации автоматизированная система, станок с ЧПУ, его узлы и блоки подвергаются воздействию механических нагрузок (вибраций, ударов, ускорений) и электрических нагрузок (напряжения, электрического

тока, мощности); они работают при различных окружающих условиях (температуре, влажности, давлении). Влияние указанных факторов проявляется в виде отклонений параметров системы от номинальных значений. Эти отклонения могут быть настолько значительными, что система становится непригодной к использованию. Когда система (узел, блок, элемент) перестает удовлетворять предъявляемым к ней требованиям, ее (узел, блок, элемент) считают отказавшей.

Для оценки поведения автоматической системы (узла, блока, элемента) в эксплуатационных условиях используется понятие надежности, которая является одной из характеристик качества системы (узла, блока, элемента), поэтому она, как и другие характеристики системы (точность, быстродействие), должна оцениваться качественно. Особенность надежности станков с ЧПУ, как технической характеристики, состоит в том, что она рассчитывается по поведению основных параметров системы при ее эксплуатации.

Физическая природа внезапных отказов (не из-за износа) системы заключается во внезапной концентрации нагрузок, действующих внутри и вне системы (узла, блока, элемента). Такие внезапные концентрации нагрузок возникают случайно и случайность внезапных отказов является лишь их непосредственно наблюдаемым следствием. Если бы эти концентрации нагрузок группировались около определенных значений времени, то их возникновение не было бы полностью случайным. Следовательно, случайность проявляется в том, что события происходят неожиданно и нерегулярно. Однако если сравнивать конкретную временную зависимость, например среднее время безотказной работы, среднее время восстановления, то для однотипных элементов и систем можно легко убедиться, что временные зависимости случайным образом колеблятся с определенным разбросом около некоторой «усредненной» величины. Когда некоторая совокупность системы (узлов, блоков, элементов) работает в условиях внешней среды, при которых происходят внезапные концентрации нагрузок, тогда и системы будут отказывать внезапно. Число отказов, возникающих в равные промежутки времени, будет примерно одинаковым, если число узлов, блоков, элементов в совокупности поддерживают постоянным путем замены отказавших. Но если не заменять отказавшие узлы, блоки и элементы,

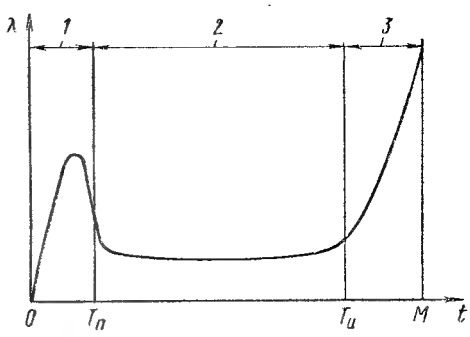


Рис. 89. Интенсивность отказов в функции времени эксплуатации:

1 — период приработки ($0—T_п$); *2* — период нормальной эксплуатации ($T_п—T_и$); *3* — период износа ($T_и—M$)

то количество исправных элементов будет экспоненциально уменьшаться и число отказов в периоды равной длительности будет также экспоненциально уменьшаться.

Построим кривую интенсивности отказов λ в зависимости от времени эксплуатации T для очень большого количества однотипных систем. Результирующая интенсивности отказов графически показана на рис. 89.

Для графика интенсивности отказов характерны три области (периода).

1. Начальному периоду эксплуатации свойственны приработочные отказы, которые характеризуются в основном причинами производственными. В этот период их происходит значительное количество. Отказывают наиболее слабые элементы со скрытыми дефектами (из-за некачественного изготовления, за счет плохой пайки, неправильного монтажа и т. п.). Продолжительность периода приработки зависит от типа узлов, блоков и элементов, входящих в систему, культуры производства и составляет обычно десятки, а иногда и сотни часов.

2. Период нормальной эксплуатации системы характеризуется пониженным уровнем и примерно постоянной интенсивностью отказов. Отказы в основном носят внезапный характер. Продолжительность этого периода зависит от среднего срока долговечности массовых элементов системы и условий эксплуатации.

3. Заключительный период работы оборудования (узлов, блоков и элементов) обусловлен износом и старением и характеризуется значительным ростом числа отказов. Наступление периода износа и дальнейшая эксплуатация оборудования без смены узлов, блоков и элементов становится нерациональной.

Как показывает опыт обработки статистических данных при эксплуатации различного оборудования, интенсивность отказов автоматизированных систем, а также отдельных узлов, блоков и элементов этих систем, не может быть аппроксимирована аналитической зависимостью, соответствующей только одному теоретическому закону безотказности. Сущность статистической оценки надежности состоит в том, что на основании полученных из опыта данных по разработанным математическим методам и законам определяют фактически возможные значения надежности с заданной точностью и достоверностью. Под достоверностью надо понимать численную величину (меру) практической уверенности получаемой оценки параметра надежности при статистическом методе определения этого параметра.

При статистической оценке любого параметра надежности необходимо знать достоверные области определения параметра надежности. Если для определенного количества отказов будут указаны доверительные границы (точности оценки) интервала случайных величин, то по формулам определения параметра надежности будут определены границы максимальных и минимальных значений этих величин. В полученной таким образом области значений параметра надежности с соответствующей достоверностью будут заключены наиболее вероятные значения величин параметра надежности. Наиболее характерными законами безотказности для систем автоматического регулирования, электронных и электрических систем, гидросистем и др. являются: экспоненциальный, нормальный, Вейбула, Эрланга, и гаммараспределения. Если рассматриваются какая-то подсистема или отдельные ее элементы, то законы безотказности характеризуются теми же зависимостями. В технической литературе [24, 49], посвященной вопросам надежности, рассмотрены все эти математические зависимости подробно, мы уже ограничимся только использованием конечных результатов.

Обилие критериев надежности объясняется тем, что последняя зависит от большого числа различных факторов, учесть которые каким-либо одним критерием представляется затруднительным. Так как процесс появления отказов в аппаратуре по своей физической основе носит случайный характер, то критерии надежности являются статистическими величинами, определяемыми на основе правил математической статистики и теории вероятности.

Для полной количественной характеристики основных сторон надежности используются различные критерии, которые удобно разделить на несколько групп.

I. Критерии безотказности. К ним относятся: 1) вероятность безотказной работы; 2) частота отказов (число отказов в единицу времени, отнесенное к первоначальному числу поставленных на испытание элементов, систем); 3) среднее время безотказной работы; 4) интенсивность отказов (число отказов в единицу времени, отнесенное к числу элементов или систем, оставшихся в исправном состоянии к началу рассматриваемого промежутка времени); 5) наработка на отказ.

Первые четыре критерия используются главным образом для оценки надежности невосстанавливаемых изделий, но при каких-то ограничениях могут быть использованы и при оценке восстанавливаемых систем. Пятый критерий имеет смысл только по отношению к восстанавливаемым изделиям.

II. Критерии восстанавливаемости. К ним относятся: 1) вероятность восстановления; 2) среднее время восстановления после отказа; 3) интенсивность восстановления (количество восстановлений в единицу времени).

III. Критерии технического обслуживания. К ним относятся: 1) вероятность технического обслуживания; 2) среднее время технического обслуживания.

IV. Эксплуатационные коэффициенты надежности. К ним относятся: 1) коэффициент использования; 2) коэффициент готовности (отношение суммарного времени исправной работы ко времени восстановления, взятых за один и тот же период эксплуатации); 3) коэффициент простоя; 4) коэффициент стоимости эксплуатации.

Применительно к станкам с системами ЧПУ можно сформулировать общую методику экспериментальной оценки эксплуатационной надежности в процессе эксплуатации или специальных испытаний на надежность. В процессе эксперимента фиксируются все случайные величины времени безотказной работы станка и системы ЧПУ между очередными отказами, случайные значения времени восстановления после каждого отказа и общее число отказов. Если оценивается не вся система или станок, а отдельные ее (его) элементы, узлы или блоки, то обработка статистических данных ведется в том же порядке. В данной работе рассматривается только часть критериев надежности станочных систем с ЧПУ; более подробно

эти вопросы рассмотрены в работах [1, 13, 21]. По полученным в процессе эксплуатации значениям определяются и рассчитываются статистические оценки показателей эксплуатационной надежности, такие как: среднестатистическое значение наработки на отказ, среднестатистическое значение времени восстановления, среднестатистические значения коэффициентов восстанавливаемости и готовности и другие критерии надежности. По заданной достоверности оценки определяются коэффициенты точности. По полученным коэффициентам точности рассчитываются доверительные границы для критериев надежности, такие, как наработки на отказ, время восстановления и коэффициенты восстанавливаемости и готовности, и другие значения статистической оценки надежности. С учетом полученных данных строят графики и области вероятности этих величин.

§ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ

Сущность эксплуатационной оценки надежности состоит в том, что на основании статистических данных об отказах по разработанным методам производится определение физически возможного значения надежности с заданной достоверностью и точностью. Для того чтобы определить характеристики надежности станков и систем ЧПУ по статистическим данным необходимо сделать ряд предположений:

1) плотность вероятности времени между отказами имеет экспоненциальную зависимость;

2) восстановление работоспособности системы и станка осуществляется обслуживающим персоналом ручным способом;

3) период «приработки» станков с системами ЧПУ прошел и наступил период нормальной эксплуатации.

Экспериментальное определение характеристик надежности и обработка статистических данных в этом случае значительно упрощаются.

Удобным для практики критерием надежности восстанавливаемых систем является среднее число часов работы между двумя соседними отказами, взятыми за определенный промежуток времени эксплуатации, обычно называемое наработкой на отказ. Для того чтобы определить среднюю статистическую величину наработки на отказ

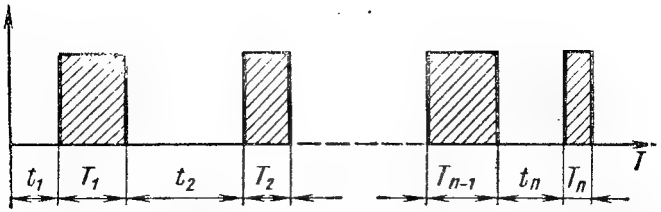


Рис. 90. К определению среднестатистической наработки на отказ: T_1, T_2, . . ., T_n — время восстановления после отказа; t_1, t_2, . . ., t_n — время исправной работы

для станков и систем ЧПУ определенного типа, берут суммарное время исправной работы аппаратуры T_p в часах, число отказов n за определенный календарный период и из соотношения $T_o^* = \frac{T_p}{n}$ определяют среднюю наработку на отказ. Определение статистической величины T_o^* поясняется рис. 90, где изображены интервалы времени исправной работы станков и аппаратуры ЧПУ — t_i и времени ее восстановления после отказа T_i без учета времени на профилактику и другие виды простоя оборудования [для какого-либо интервала (периода), не показанного на рисунке]. Продолжительность времени исправной работы t_i между любыми двумя соседними отказами является величиной случайной, точное значение которой заранее предсказывать невозможно. Поэтому пользуются усредненной статистической величиной T_o^*, определяемой по данным опыта эксплуатации.

Общее время работы станков с системами ЧПУ за определенный календарный срок равно сумме интервалов рабочего времени между соседними отказами, т. е.

$$T_p = t_1 + t_2 + \cdots + t_n = \sum_{i=1}^{n} t_i.$$

Тогда соотношение для определения среднестатистической величины

$$T_o^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} = \frac{T_p}{n},$$

где n — число отказов за время эксплуатации в календарном периоде;

t_i — время исправной работы между отказами в календарном периоде.

Если наработка на отказ определяется по нескольким станкам и системам ЧПУ одного типа, то необходимо просуммировать время исправной работы по всем системам и станкам и разделить на общее число отказов, или в математической форме:

$$T_o^* = \frac{\sum_{j=1}^{M} \sum_{l=1}^{n} t_{jl}}{\sum_{j=1}^{M} n_j},$$

где M — число станков (систем, узлов, блоков или элементов);

t_{jl} — время исправной работы всех однотипных станков (систем, узлов, блоков, элементов);

n_j — число отказов всех станков (систем, узлов, блоков, элементов) в календарном периоде.

Точность экспериментальной оценки средней величины наработки на отказ по существу зависит от количества полученных при эксплуатации отказов и времени проведения этого эксперимента. При увеличении накопленного числа отказов величина T_o^* приближается к математическому ожиданию времени работы станков с ЧПУ между отказами, т. е. при $n \to \infty\, T_o^* \to T_o$. Наработка на отказ является хорошим и удобным для практики критерием надежности, так как при определении его в реальных условиях эксплуатации учитываются все факторы, влияющие на надежность станков с системами ЧПУ.

Для расчета доверительных пределов при оценке точности экспериментального определения среднего времени наработки на отказ и оценки нижнего и верхнего значений можно воспользоваться формулами, приведенными в работах [1, 49]:

$$T_{o\,min} = \frac{T_o^*}{\delta_{02}} \leqslant T_o \leqslant \frac{T_o^*}{\delta_{01}} = T_{o\,max},$$

где δ_{01} и δ_{02} — коэффициенты точности, зависящие от числа n и коэффициента достоверности γ.

Зная минимально возможные значения T_{omin} и максимальное T_{omax} для параметра T_o, можно определить дове-

рительную область для вероятности безотказной работы $P(t)$ (при любом значении t), т. е.

$$P_{\min}(t) = e^{-\frac{t}{T_{o\min}}} \text{ и } P_{\max}(t) = e^{-\frac{t}{T_{o\max}}}.$$

Для иллюстрации применения метода определения значения наработки на отказ, экспериментального определения среднего времени безотказной работы при внезапных отказах в станках с системами ЧПУ и при заданной достоверности рассмотрим обработку статистических данных по отказам, проведенную в течение двух лет по группе станков с фазовой системой ЧПУ. Анализ будет проведен по отдельным элементам, узлам, блокам системы и станка. Результаты эксплуатационных данных по станкам с ЧПУ приведены в табл. 4. По данным таблицы рассчитаем среднестатистическое значение наработки на отказ по электронным блокам

$$T_o^* = \frac{T_p}{n} = \frac{117157{,}3}{211} = 555{,}3.$$

Таблица 4

Результаты эксплуатационных данных по станкам с ЧПУ

Узлы и блоки	T_p в ч	n	$\tau_в^*$ в ч
Электронные блоки	117 157,3	211	1023,3
Пускорегулирующая аппаратура . . .	117 157,3	260	1233,4
Лентопротяжный механизм	117 157,3	163	674,8
Узлы гидросистемы	117 157,3	244	1478,7
Механические узлы	117 157,3	186	1708,9

Примечание. $\tau_в^*$ — статистическое время восстановления.

По таблицам и графикам, приведенным в работах [13, 49], определим коэффициенты точности оценки: для достоверности $\gamma = 90\%$ они соответственно равны $\sigma_{01} = 0{,}883$ и $\sigma_{02} = 1{,}117$. С учетом коэффициента точности оценки определим нижнюю и верхнюю границы среднего значе-

ния безотказной работы электронных блоков системы ЧПУ:

$$T_{\text{o min}} = 497{,}1 = \frac{555{,}3}{1{,}117} =$$

$$= \frac{T_{\text{o}}^{*}}{\delta_{02}} \leqslant T_{\text{o}} \leqslant \frac{T_{\text{o}}^{*}}{\delta_{01}} = \frac{555{,}3}{0{,}883} = 629{,}2 = T_{\text{o max}}.$$

Значения параметров для всех остальных узлов и блоков помещены в табл. 5. По известным значениям $T_{\text{o min}}$ и $T_{\text{o max}}$ находим наиболее возможные значения вероятности того, что узлы и блоки станков и систем ЧПУ про-

Таблица 5

Величины средней наработки на отказ по узлам и блокам фазовой системы ЧПУ

Узлы и блоки	T_p в ч	n	$\tau_{\text{в}}^{*}$ в ч	$\delta_{01\,\text{min}}$
Электронные блоки	117 157,3	211	1023,3	0,883
Пускорегулирующая аппаратура	117 157,3	260	1233,4	0,893
Лентопротяжный механизм	117 157,3	163	674,8	0,862
Узлы гидросистемы	117,157,3	244	1478,7	0,890
Механические узлы	117 157,3	186	1708,9	0,874
Узлы и блоки	$\delta_{02\,\text{max}}$	T_{o}^{*} в ч	$T_{\text{o min}}$	$T_{\text{o max}}$
Электронные блоки	1,117	555,3	497,1	629,2
Пускорегулирующая аппаратура	1,107	450,6	407,7	504,9
Лентопротяжный механизм	1,138	718,8	631,6	834,1
Узлы гидросистемы	1,110	480,2	432,6	539,5
Механические узлы	1,126	629,9	559,4	720,9

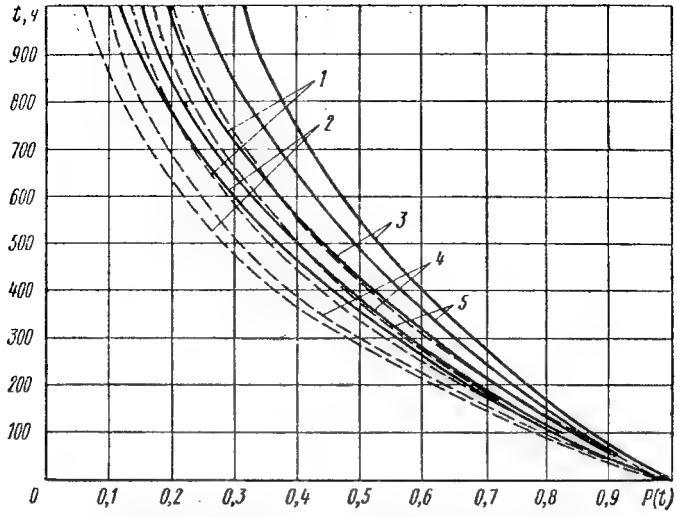


Рис. 91. Графики минимальной и максимальной области наиболее возможных значений P (t) для узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ (штриховые линии — минимальные значения, сплошные максимальные значения):

1 — электронные блоки; *2* — пускорегулирующая аппаратура; *3* — лентопротяжной механизм; *4* — узлы гидравлической системы; *5* — механические узлы

работают безотказно в течение времени t, т. е. определяем доверительные области наиболее возможных значений

$$P_{\min}(t) = e^{-\frac{t}{T_{\text{o min}}}} \text{ и } P_{\max}(t) = e^{-\frac{t}{T_{\text{o max}}}}.$$

Графики этих значений изображены на рис. 91.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСЛЕ ОТКАЗА

Надежным является то металлорежущее оборудование, которое, хотя и отказывает в работе, но, во-первых, сравнительно редко, а во-вторых, поиск и устранение возникшей неисправности возможно за небольшой промежуток времени. Станки с системами ЧПУ являются системами длительного использования, которые после отказов восстанавливаются и продолжают функционировать. Под восстанавливаемостью понимают свойства устройства, которые заключаются в возможности его использования после проведения ремонта или каких-либо

других мероприятий по устранению отказа с учетом качества обслуживания. Процесс восстановления заключается в обнаружении и устранении отказа, причем процесс восстановления отказов является вероятностным. В качестве случайной величины здесь выступает время восстановления, зависящее от многих факторов, характера возникшего отказа, приспособленности устройства к быстрому обнаружению отказа, степени подготовленности обслуживающего персонала, быстроты замены отказавшего элемента, узла, блока. При этом небезынтересно отметить, что некоторые узлы (например, электро- и гидросхемы) современных станочных систем настолько сложны, что поиск неисправности занимает нередко значительно больше времени, чем сама операция по устранению этой неисправности. По данным Н. Г. Бруевич, диагностика отказа занимает до 56% общего времени восстановления электросхемы.

Наиболее удобным критерием восстановления, при статистической оценке восстанавливаемости станков с ЧПУ, систем, узлов и блоков, является среднее время восстановления $T_в$. Для большинства автоматизированных систем, в том числе и станков с системами ЧПУ, восстановление работоспособности в основном осуществляется обслуживающим персоналом с применением ручного труда. Для таких систем характерно малое число восстановлений за малые и большие промежутки времени τ и довольно частые случаи восстановления за время, близкое к среднему времени восстановления $T_в$. Количественно восстанавливаемость станков с системами ЧПУ может быть оценена как среднее арифметическое. В этом случае определение статистического значения величины $T_в^*$ аналогично определению среднего времени наработки на отказ. Если за определенный период эксплуатации станков с ЧПУ произошло n отказов, то, просуммировав промежутки времени, затраченные на обнаружение и устранение отказов и разделив эту величину на число восстановлений, равное числу отказов, получим величину среднего времени восстановления

$$T_в^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i}{n} = \frac{\tau_в^*}{n},$$

где τ_i — время, затраченное на восстановление i-го отказа;
n — число отказов в календарном периоде.

Если имеется несколько станков одного типа, то следует просуммировать промежутки времени восстановления по всем экземплярам и разделить эту сумму на общее число отказов. Величина $T_в$ показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа. Следует отметить, что величина $T_в$ будет тем точнее, чем больше используется статистических данных при расчете. Очевидно также, что величина $T_в$ в значительной мере зависит от технической подготовленности обслуживающего персонала и наличия у него опыта по обнаружению и устранению отказов. Поэтому при вычислении $T_в$ следует обобщить статистические данные не только по большему количеству станков с ЧПУ, но и учесть обслуживание систем различным персоналом, с различной степенью подготовленности и квалификацией, с тем, чтобы снизить влияние субъективного фактора и получить усредненный результат.

Для определения доверительных пределов при оценке точности эксплуатационного времени восстановления воспользуемся оценочными коэффициентами, зависящими от коэффициента достоверности γ и числа отказов n; тогда среднее время восстановления с учетом коэффициентов точности

$$T^*_{в\,min} = \frac{T^*_в}{\delta_{в\,2}} \leqslant T_в \leqslant \frac{T^*_в}{\delta_{в\,1}} = T^*_{в\,max},$$

где $\delta_{в1}$ и $\delta_{в2}$ — коэффициенты точности.

В качестве примера воспользуемся статистическими данными, приведенными в табл. 4, и рассчитаем среднестатистическое время восстановления лентопротяженного механизма системы числового программного управления станка с фазовой системой. Оно составит

$$T^*_в = \frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i}{n} = \frac{674{,}8}{163} = 4{,}13.$$

По таблицам и графикам, приведенным в работах [1, 49], определяем коэффициенты точности оценки; они для коэффициента достоверности $\gamma = 90\%$ и числа отказов n равны $\delta_{в1} = 0{,}905$ и $\delta_{в2} = 1{,}095$. Тогда определяем доверительные границы

$$T_{в\,min} = 3{,}78 = \frac{4{,}13}{1{,}095} = \frac{T^*_в}{\delta_{в\,2}} \leqslant T_в \leqslant \frac{T^*_в}{\delta_{в\,1}} = \frac{4{,}13}{0{,}905} =$$
$$= 4{,}56 = T_{в\,max}.$$

Значения среднестатистического времени восстановления узлов и блоков станка с фазовой системой ЧПУ приведены в табл. 6. Принимая, что время восстановления

Таблица 6

Величины среднего времени восстановления узлов и блоков фазовой системы ЧПУ

Узлы и блоки	T_p в ч	n	$\tau_в^*$ в ч	$\delta_{в1\,min}$
Электронные блоки	117 157,3	211	1023,3	0,920
Пускорегулирующая аппаратура	117 157,3	260	1233,4	0,926
Лентопротяжный механизм	117 157,3	163	674,8	0,905
Узлы гидросистемы	117,157,3	244	1478,7	0,923
Механические узлы	117 157,3	186	1708,9	0,915
Узлы и блоки	$\delta_{в2\,max}$	$T_в^*$ в ч	$T_{в\,min}$	$T_{в\,max}$
Электронные блоки	1,077	4,85	4,50	5,27
Пускорегулирующая аппаратура	1,068	4,74	4,44	5,12
Лентопротяжный механизм	1,095	4,13	3,78	4,57
Узлы гидросистемы	1,070	6,06	5,66	6,57
Механические узлы	1,085	9,19	8,47	10,04

станков с ЧПУ подчиняется закону Эрланга, и зная доверительные границы $T_{в\,min}$ и $T_{в\,max}$, определим доверительную область для вероятности восстановления $v(\tau)$, лежащую в границах $T_{в\,min}$ и $T_{в\,max}$ [49]:

$$v_{min}(\tau) = 1 - \left(1 + \frac{2\tau}{T_{в\,max}}\right) e^{-\frac{2\tau}{T_{в\,max}}};$$

$$v_{max}(\tau) = 1 - \left(1 + \frac{2\tau}{T_{в\,min}}\right) e^{-\frac{2\tau}{T_{в\,min}}}.$$

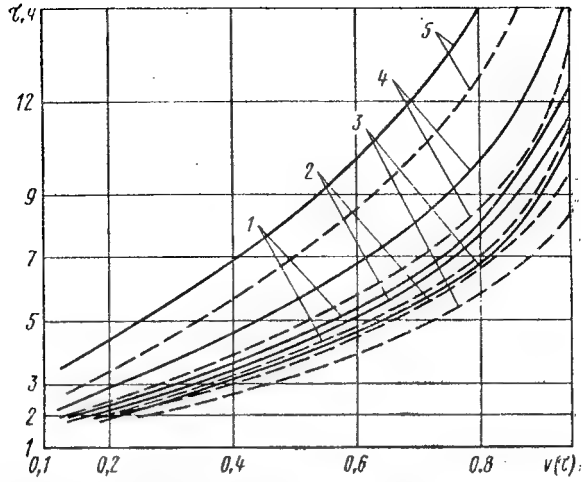


Рис. 92. Графики минимальных и максимальных значений вероятности восстановления для узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ (значения кривых те же, что и на рис. 91)

Графики минимальных и максимальных значений вероятности восстановления для узлов и блоков станков с ЧПУ приведены на рис. 92.

Вывод значений v_{min} и v_{max} оказывается логичным, поскольку чем больше времени отводится на выполнение операции по восстановлению системы после отказа, тем больше должна быть вероятность успешного выполнения работы по обнаружению и устранению отказа. Таким образом, при заданном достаточном количестве времени любое устройство может быть восстановлено до своей эксплуатационной эффективности.

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЧИСЛА НЕРАБОТАЮЩИХ УЗЛОВ, БЛОКОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СТАНКОВ С ЧПУ

К непрерывно действующим и обслуживаемым системам, в нашем случае системам станков с ЧПУ, обычно применяют еще один критерий, определяющий надежность, так называемый коэффициент готовности. Под готовностью будем понимать способность системы находиться в процессе эксплуатации в работоспособном и готовом к применению состоянии.

Рассмотрим процесс эксплуатации непрерывно функционирующей системы при наличии окончательных отказов. В случае отказа система некоторое время находится в нерабочем состоянии — ремонтируется. Очевидно, время эксплуатации системы будет состоять из чередований случайных интервалов времени нахождения в исправном и неисправном состоянии. Иначе говоря, непрерывную работу системы нужно понимать в том смысле, что она в течение времени эксплуатации находится в двух состояниях: работы и ремонта. При этом система может выключаться на некоторое время и не работать, например, из-за отсутствия рабочего. Если в период выключения системы она не отказывает и не ремонтируется, то эти периоды просто исключают из рассмотрения и считают, что время эксплуатации состоит только из чередующихся последовательных случайных интервалов времени работы и ремонта.

Если рассматривать среднюю наработку на отказ T_0^* как рабочее время (исправное состояние системы), а время восстановления $T_в^*$ как простой (неисправное состояние системы), то формулу коэффициента готовности можно написать в следующем виде [1, 13]:

$$K_г^* = \frac{T_0^*}{T_0^* + T_в^*} = \frac{1}{1 + \dfrac{T_в^*}{T_0^*}} = \frac{1}{1 + K_в^*},$$

где $K_в^* = \dfrac{T_в^*}{T_0^*}$ — вспомогательный статистический коэффициент восстанавливаемости, по которому оценивается отношение $K_в = \dfrac{T_в}{T_0}$.

Как следует из формулы, значение коэффициента готовности может быть получено близким к единице за счет увеличения среднего времени безотказной работы T_0 (среднего значения наработки на отказ) при фиксированном среднем значении времени восстановления $T_в$ либо за счет уменьшения среднего времени восстановления после отказа при фиксированном T_0. Больший эффект может быть получен при одновременном увеличении среднего времени T_0 и уменьшении $T_в$.

Для статистической правильной оценки значений $K_г$ можно рассчитать возможные значения неизвестных коэффициентов точности в зависимости от требуемой достовер-

ности их оценки γ и числа отказов n. Доверительные границы для наиболее вероятных значений коэффициента восстанавливаемости

$$K_{\text{в min}} = \frac{K_{\text{в}}^*}{\varepsilon_{\text{в}2}} \leqslant K_{\text{в}} \leqslant \frac{K_{\text{в}}^*}{\varepsilon_{\text{в}1}} = K_{\text{в max}},$$

где $\varepsilon_{\text{в}1}$ и $\varepsilon_{\text{в}2}$ — коэффициенты точности, зависящие от γ и n.

Зная доверительные границы $K_{\text{в min}}$ и $K_{\text{в max}}$ для коэффициента восстанавливаемости, можно оценить минимальное и максимальное значения области возможных значений коэффициента готовности:

$$K_{\text{г min}} = \frac{1}{1 + K_{\text{в max}}} \leqslant K_{\text{г}} \leqslant \frac{1}{1 + K_{\text{в min}}} = K_{\text{г max}}.$$

Для иллюстрации определения коэффициента готовности воспользуемся статистическими данными, приведенными в табл. 7. Определим коэффициент восстанавливаемости гидравлической системы станка с ЧПУ с учетом точности и достоверности оценки. Значения коэффициентов $\varepsilon_{\text{в}1}$ и $\varepsilon_{\text{в}2}$ используем из работ [13, 49]; для достоверности оценки $\gamma = 90\%$ они численно равны $\varepsilon_{\text{в}1} = 0{,}875$ и $\varepsilon_{\text{в}2} = 1{,}145$.

Тогда коэффициент восстанавливаемости

$$K_{\text{в min}} = 0{,}01023 = \frac{0{,}01262}{1{,}145} =$$

$$= \frac{K_{\text{в}}^*}{\varepsilon_{\text{в}2}} \leqslant K_{\text{в}} \leqslant \frac{K_{\text{в}}^*}{\varepsilon_{\text{в}1}} = \frac{0{,}01262}{0{,}875} = 0{,}01442 = K_{\text{в max}},$$

откуда коэффициент готовности

$$K_{\text{г min}} = 0{,}98578 = \frac{1}{1 + 0{,}01442} \leqslant K_{\text{г}} \leqslant \frac{1}{1 + 0{,}01023} =$$

$$= 0{,}98988 = K_{\text{г max}}.$$

Значения коэффициентов восстанавливаемости и готовности для всех остальных узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ представлены также в табл. 7.

Иногда в процессе эксплуатации необходимо знать, какое количество неисправных систем находится в данный момент в производстве. Если задано общее количество M_0, предполагаемых к эксплуатации станков с системами ЧПУ, для которых была проведена оценка надежности по статистическим данным и определен коэф-

Таблица 7

Значения параметров надежности по узлам и блокам фазовой системы ЧПУ

Значение	Электронные блоки	Пускорегулирующая аппаратура	Лентопротяжный механизм	Узлы гидросистемы	Механические узлы
n	211	260	163	244	186
$\tau_в^*$ в ч	1023,3	1233,4	674,8	1478,7	1708,9
δ_{o1} min	0,883	0,893	0,862	0,890	0,874
δ_{o2} max	1,117	1,107	1,138	1,110	1,126
$\delta_{в1}$ min	0,920	0,926	0,905	0,923	0,915
$\delta_{в2}$ max	1,077	1,068	1,095	1,070	1,085
ε_1 min	0,863	0,878	0,845	0,875	0,855
ε_2 max	1,156	1,141	1,186	1,145	1,168
T_o^* в ч	555,3	450,6	718,8	480,2	629,9
$T_в^*$ в ч	4,85	4 74	4,13	6,06	9,19
$K_в^*$	0,00873	0,01053	0,00576	0,01262	0,01459
T_o min	497,1	407,7	631,6	432,6	559,4
T_o max	629,2	504,9	834,1	539,5	720,9
$T_в$ min	4,50	4,44	3,78	5,66	8,47
$T_в$ max	5,27	5,12	4,57	6,57	10,04
$K_в$ min	0,00755	0,00922	0,00485	0,01023	0,01249
$K_в$ max	0,01012	0,01199	0,00681	0,01442	0,01706
$K_г$ min	0,98998	0,98815	0,99323	0,98578	0,98323
$K_г$ max	0,99250	0,99086	0,99517	0,98988	0,98767

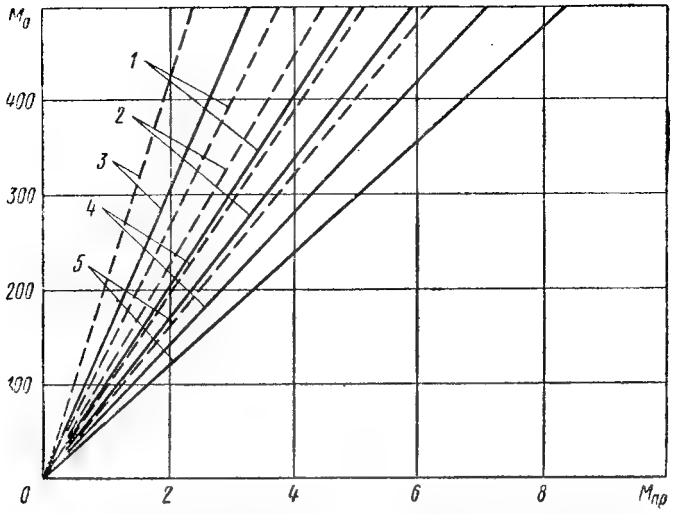


Рис. 93. Графики минимального и максимального количества простаивающих узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ (значения кривых те же, что и на рис. 91)

фициент готовности, то среднее число простаивающих систем

$$M_{пр\ min} = M_o(1 - K_{г\ max}) \leqslant M_{пр} \leqslant M_o(1 - K_{г\ min}) = M_{пр\ max},$$

где $M_{пр}$ — число простаивающих систем в любой момент эксплуатации.

Количество простаивающих (неисправных) узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ в зависимости от количества находящихся в эксплуатации приведено на рис. 93. Графики построены на основе статистического анализа работы станков с фазовой системой ЧПУ.

Надежность восстанавливаемых систем — количественный критерий их работоспособности — в основном определяется безотказностью и восстанавливаемостью. Следовательно, количество простаивающих систем дает количественную оценку двух критериев и, как следствие, оценку технического обслуживания этих систем.

Анализ различных сторон технического обслуживания позволяет оценить надежность восстанавливаемых систем, а следовательно, решить следующие практические (частные) задачи.

1. Оценить работоспособность системы в любой момент времени. Эта характеристика для начала основного рабочего периода является критерием готовности, а для любого произвольного момента времени — критерием обобщенной готовности или надежности восстанавливаемой системы.

2. Определить вероятность нахождения системы в течение фиксированного или больше чем фиксированный интервал времени в ремонте (вероятность простоя системы). Оценку времени простоя системы можно производить по моментам распределения времени простоя, например по его среднему времени.

3. Определить распределение отказов в течение заданного интервала времени, а также оценить его средними значениями количества отказов. Получение указанной оценки представляет практический интерес, так как она позволяет правильно выбрать количество запасных деталей, необходимых для замены, определить оптимальное количество ремонтных рабочих и их специальность.

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМИ ОБСЛУЖИВАНИЯМИ ОБОРУДОВАНИЯ

В процессе эксплуатации автоматизированных систем должна обеспечиваться надежность существующих устройств и должны собираться и обобщаться данные, необходимые для разработки новых технических устройств. Для выполнения этих задач проводится большое число мероприятий, которые можно разбить на четыре группы: 1) разработка научных методов эксплуатации оборудования; 2) сбор и обобщение опыта эксплуатации; 3) обмен опытом между изготовителями, проектными организациями и эксплуатирующими предприятиями по модернизации и увеличению надежности; 4) повышение квалификации работников, обслуживающих данную аппаратуру.

Научные методы эксплуатации включают в себя научнообоснованные приемы подготовки к работе, правила проведения профилактики и ремонта и другие мероприятия по обеспечению надежности технических устройств в процессе их эксплуатации [13]. Основная цель профилактического обслуживания аппаратуры после начального периода эксплуатации (периода приработки) —

устранить влияние на работоспособность постепенных (износовых) отказов. Интервалы времени, через которые необходимо проводить профилактические мероприятия (технические осмотры, регламентные работы, ремонт), чаще всего определяются путем тщательного анализа характеристик изнашивания и старения основных элементов, узлов и блоков системы. Профилактические мероприятия приводят к сложным и противоречивым последствиям. С одной стороны, перед обслуживающим персоналом возникают противоречивые требования: необходимо повышать надежность оборудования за счет проведения профилактических работ, что требует значительных затрат времени, однако длительный простой дорогостоящего оборудования на профилактике экономически невыгоден. С другой стороны, в процессе проведения профилактических мероприятий технические устройства подвергаются механическим нагрузкам, электрическим перегрузкам и другим нежелательным воздействиям, в результате чего увеличивается интенсивность отказов в период после профилактики. Однако существуют оптимальные условия проведения профилактического обслуживания, при которых обеспечивается достаточно высокая надежность оборудования после проведения профилактик и сокращается время простоя.

На рис. 94 показано при существующих условиях эксплуатации условное изменение во времени параметров основных элементов станков с системами ЧПУ, включая те, которые имеют наименьшее время износа (старения). Если приведенные кривые являются усредненными, то простейший метод нахождения периодичности и объема

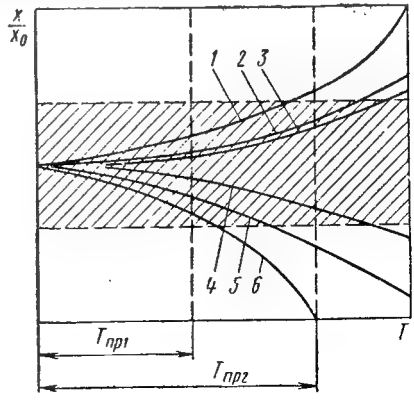


Рис. 94. Условное изменение во времени параметров основных элементов станков с ЧПУ:

1 — износ магнитной головки; *2* — появление зазоров в механической передаче датчиков обратной связи; *3* — разрегулировка прижимного ролика лентопротяжного механизма; *4* — изменение обратного коллекторного тока транзистора; *5* — изменение тягового усилия электромеханического преобразователя; *6* — изменение выходного напряжения тахогенератора; $T_{пр1}$ — период первого технического обслуживания; $T_{пр2}$ — период второго технического обслуживания

профилактических работ состоит в следующем: с некоторым запасом по сравнению с временем наступления отказа вследствие износа наименее надежных элементов (у нас *1*, *5* и *6*) назначается первое техническое обслуживание (регламентные работы) с периодом $T_{пр1}$ (заштрихованные области характеризуют выход параметров элементов за пределы допустимых значений). Если по другим соображениям (например, для проверки механических, гидравлических узлов, регулировочных работ) этот период будет слишком большим, то устанавливают соответственно меньшее время для проведения этих работ.

Следует также заметить, что поле допуска для различных элементов, узлов и блоков будет различным. В объем первого обслуживания, наряду с другими необходимыми проверками и регулировками, должна входить проверка и при необходимости замена элементов *1*, *5* и *6*. При этом считается, что параметры замененных (или отрегулированных) элементов возвращены в начальное состояние. Подобным же образом начинается второе техническое обслуживание с периодом $T_{пр2}$ и т. д. При втором техническом обслуживании объем работ (проверок и замен) будет больше, чем в первом, поскольку наряду с проверкой (заменой) элементов *2*, *3* и *5* групп необходимо проверить и параметры элементов *1*, *5* и *6* групп.

Здесь изложен физический принцип определения периодичности профилактических мероприятий. В настоящее время в ряде случаев применяются на практике математические методы определения периодичности профилактических работ, которые подробно освещены в работах [13, 49].

При назначении периода времени $T_{пр}$ между профилактиками целесообразно исходить из условия, что средняя интенсивность потока отказов системы за это время была минимальной.

Рассмотрим общую задачу, позволяющую связать показатели надежности с периодом $T_{пр}$ между очередными профилактическими работами. В качестве показателя надежности принимается вероятность того, что в произвольный момент времени аппаратура работоспособна и безотказно работает в течение времени t, т. е. вероятность безотказности работы аппаратуры описывается законом

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_0}},$$

где t — требуемое время работы;

T_0 — средняя наработка на отказ.

Предполагаем, что после проведения профилактических мероприятий работоспособность аппаратуры восстанавливается до первоначального состояния, что эквивалентно замене аппаратуры.

Возможны два способа планирования профилактических работ: 1) помимо проведения запланированной профилактики, после каждого отказа (ремонта) проводится внеплановая профилактика, после чего планируется заново очередная профилактика; 2) вне зависимости от того, возникали или нет отказы аппаратуры в межпрофилактический период, проводится плановая профилактика. Второй способ оптимального планирования менее целесообразен, так как возможно случайное совпадение отказа и восстановление аппаратуры с близко назначенной профилактикой. Поэтому первый способ имеет преимущество, рассмотрим его.

Среднее время между профилактиками $T_{пр}$ вычисляется для времени t аналогично тому, как вычисляется средняя наработка на отказ. Время $T_{пр}$ фактически представляет собой среднее время между ремонтами как плановыми, так и внеплановыми. В случае экспоненциального закона распределения вероятности между отказами среднее время между профилактиками

$$T_{пр} = T_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right) = T_0\, \theta\,(t),$$

где $T_{пр}$ — время между профилактиками в ч;

t — время календарного периода, для которого определяется периодичность профилактики, в ч;

T_0 — средняя наработка на отказ в ч;

$\left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right) = \theta\,(t)$ — вероятность ненадежности.

Таким образом, $T_{пр}$ равно произведению средней наработки на отказ и ненадежности для периода времени t.

Для станков с фазовой системой ЧПУ по статистическим данным приведены в табл. 7, рассчитаны и построены графики периодичности профилактики для электронных блоков *1*, пускорегулирующей аппаратуры *2*, гидросистемы *4*, механических узлов *5* и лентопротяжного механизма *3*, которые изображены на рис. 95.

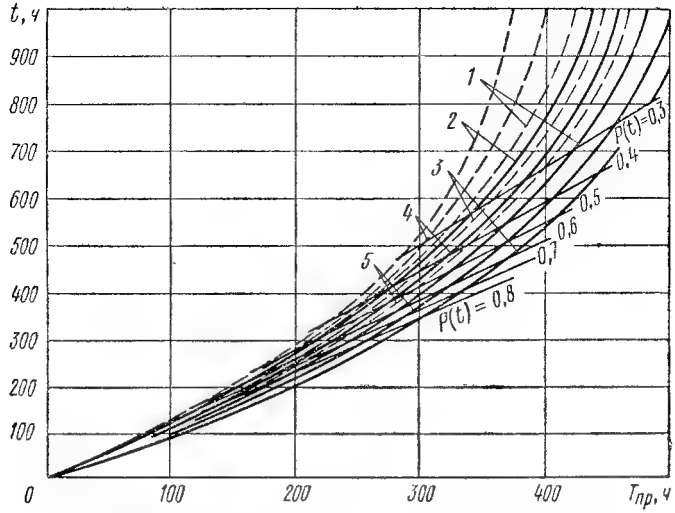


Рис. 95. Графики периодичности профилактик для узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ (обозначения см. на рис. 91):

P (t) — вероятность безотказной работы между профилактиками

Наряду с высококачественным выполнением профилактических работ надежность станков с системами ЧПУ в процессе эксплуатации обеспечивается применением методов прогнозирования отказов и предотвращения их, обязательной инструментальной (приборной) проверкой и «тренировкой» элементов и блоков, в условиях, близких к эксплуатационным («тренированные» элементы и блоки устанавливаются взамен отказавших), качественной подготовкой обслуживающего персонала, а также повышением уровня организации процесса эксплуатации и ремонта.

§ 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Анализ различных сторон технического обслуживания позволяет оценить надежность восстанавливаемых систем, а следовательно, решить одну из практических задач — обеспечение необходимым количеством запасных частей, которое позволит рационально сократить время на восстановление системы после отказа. В процессе экс-

плуатации станков с ЧПУ нередки случаи, когда нет необходимых запасных элементов, блоков и узлов, в результате чего станки длительное время простаивают. Следовательно, восстанавливаемость станков с ЧПУ, как систем многократного действия, является функцией количества запасных элементов, узлов и блоков. Количество запасных элементов, блоков и узлов, необходимых для постоянного поддержания надлежащей и эффективной работы оборудования, имеет весьма важное значение. Поэтому определение количества запасных частей должно производиться на научной основе. Если, например, под рукой находится слишком мало запасных деталей, то это может весьма отрицательно повлиять на выполнение поставленного задания. С другой стороны, если предусмотреть слишком большое количество запасных частей, то это приводит к излишним затратам, неэкономичному использованию складских помещений и в некоторых случаях к залеживанию дефицитных материалов. Зная принципы обеспечения надежности можно достаточно точно определить потребность в запасных частях. Самый простой способ определения потребности в запасных частях (среднее количество) состоит в делении предполагаемого срока службы элемента, узла, блока на величину наработки на отказ.

Очевидно, для более точного определения количества запасных частей надо пользоваться более уточненными методами расчета. Основная задача состоит в том, чтобы количество запасных частей было достаточным во избежание создания дефицита в самые критические периоды времени работы. Для определения требуемого количества запасных частей существует много математических методов [13, 49], которые позволяют произвести расчет с определенным уровнем доверительности. Для станков с системами ЧПУ можно пользоваться упрощенным методом [17]. Уравнение, позволяющее определить количество запасных элементов в узлах и блоках станков с ЧПУ по статистической оценке надежности для определенного календарного периода, имеет следующий вид:

$$A_z = (\lambda_{ср} t + z\sqrt{\lambda_{ср} t})\, M_o,$$

где $\lambda_{ср} = \frac{1}{T_o}$ — интенсивность отказов элементов, узлов и блоков по статистическим данным эксплуатации;

t — общее число часов в календарном сроке;
z — коэффициент, зависящий от доверительного уровня;
M_0 — число эксплуатируемых станков;
A_z — количество запасных частей.

В качестве примера рассмотрим определение количества запасных элементов к узлам и блокам для станков с фазовой системой ЧПУ из расчета месячного запаса и количества установленных элементов в блоках и узлах на станке типа ФП-7. На станке установлено шесть электронных блоков, 70 установочных элементов пускорегулирующей аппаратуры, 40 элементов лентопротяжного механизма; в станке 24 гидроузла и 21 механический узел.

Для определения значения коэффициента z для различной достоверности γ воспользуемся табл. 8.

Опуская математические расчеты для определения количества запасных частей для станков, построим графики минимального и максимального их количества в зависимости от числа станков, находящихся в эксплуатации,

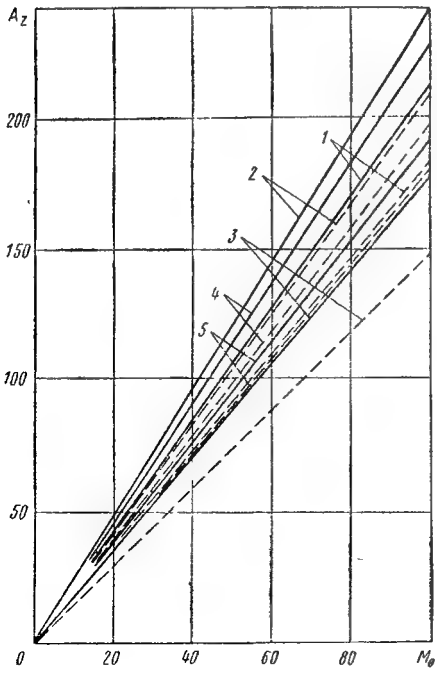


Рис. 96. Графики минимального и максимального количества запасных частей по узлам и блокам станков с фазовой системой ЧПУ (обозначения см. на рис. 91)

Таблица 8

Значение коэффициента z для различных значений коэффициента достоверности

z	γ
0,68	50
0,84	60
1,04	70
1,28	80
1,44	85
1,64	90,0
1,96	95,0
2,24	97,5
3,00	99,73
3,54	99,96

статистически определенной интенсивности отказов и доверительного уровня. Графическая зависимость количества запасных частей для станков с ЧПУ приведена на рис. 96.

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАНКА С ЧПУ И ОТДЕЛЬНЫХ ЕГО БЛОКОВ И УЗЛОВ

В процессе эксплуатации станков с ЧПУ встречаются случаи, когда большое число однотипных станков периодически проверяется, восстанавливается или подготовляется к использованию при ограниченном количестве обслуживающего персонала, проводящего операции по обслуживанию. Если имеется K наладчиков, обслуживающих M станков, то такая система, согласно теории массового обслуживания, относится к случайным процессам, зависящим от технического состояния оборудования, характера требуемых регулировок и настроек, наличия возможных отказов и наличия определенного количества наладчиков. Так как один наладчик может одновременно обслужить только один станок или устройство, то, если в момент поступления очередного требования на обслуживание имеются свободные наладчики, один из них приступает к устранению отказа немедленно, если же все наладчики в этот момент заняты, станок или устройство простаивает до того момента, пока освободится один из наладчиков. Следовательно, если число отказов превышает число наладчиков, то образуется очередь на обслуживание. В результате ожидания очереди на обслуживание величина простоя оборудования увеличивается.

Для количественной оценки процесса технического обслуживания можно воспользоваться вероятностными критериями, которые в математическом смысле аналогичны ранее рассмотренным критериям надежности. К числу таких критериев можно отнести среднее время обслуживания станка, узла или блока.

Под средним временем обслуживания $T^*_{\text{то}}$ понимается математическое ожидание времени технического обслуживания станка или устройства. Математически оно определяется как отношение суммарного времени, затраченного на обслуживание всех однотипных станков, узлов

и блоков, к числу обслуженных станков, узлов и блоков, т. е.

$$T^*_{\text{то}} = \frac{\sum_{i=1}^{M} t_{\text{то}\,i}}{M},$$

где $t_{\text{то}i}$ — время обслуживания i-го станка, узла, блока в календарном периоде;

M — число станков, узлов, блоков.

Величина $T^*_{\text{то}}$ показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обслуживание одного станка, узла, блока. При большом объеме статистических данных величина $T^*_{\text{то}}$ близка к математическому ожиданию среднего времени обслуживания.

Если $T^*_{\text{то}}$ определено для различных узлов и блоков, то, очевидно, можно определить не только количество, но и квалификацию наладчиков, необходимых для обслуживания отдельных подсистем станков с ЧПУ. В табл. 9

Таблица 9

Среднее время технического обслуживания узлов и блоков фазовой системы ЧПУ

Узел, блок	$t_{\text{то}}$ в ч	M в шт.	$T^*_{\text{то}}$ в ч
Электронные блоки	42,6	96	0,44
Пускорегулирующая аппаратура	51,4	16	3,21
Лентопротяжный механизм	28,1	16	1,76
Узлы гидросистемы	61,6	48	1,28
Механические узлы	71,2	48	1,48

даны среднестатистические значения времени обслуживания отдельных узлов и блоков станков с фазовой системой ЧПУ, которые были определены по статистическим данным при эксплуатации этих станков в течение двух лет. По этом же данным можно определить потребное количество каждой квалификации наладчиков, необходимых для обслуживания станков с ЧПУ. Для обслуживания электронных блоков, пускорегулирующей аппаратуры и лентопротяжного механизма необходим наладчик-электроник, электрик, для гидросистемы — наладчик-гидравлик и для механических узлов — наладчик-меха-

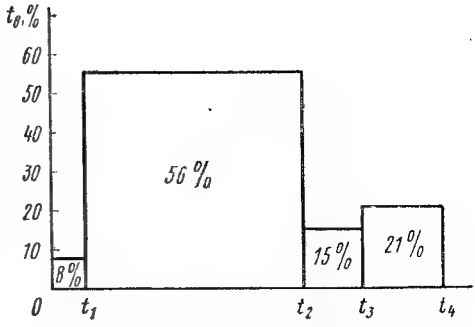


Рис. 97. Распределение времени восстановления после отказа:

0 — t_1 — индикация (установление) наличия отказа; t_1—t_2—диагностика отказа; t_2—t_3 — ремонт (замена отказавших элементов); t_3—t_4 —настройка, регулировка системы станка; $t_в$ — доля времени восстановления

ник. Специализация обслуживающего персонала по квалификации, особенно при больших масштабах производства, позволяет сократить время на поиск, устранение неисправности и улучшает качество ремонта после отказа. Время на восстановление после отказа системы автоматизированного управления распределено следующим образом (рис. 97). Основную часть времени восстановления занимает время, затраченное на диагностику отказа, т. е. определение места (узла, блока) и отказавшего элемента. Не будет большой ошибкой, если эти рассуждения применить и для систем станков с ЧПУ. Продолжительность этого времени составляет более 50% от общего времени, затраченного на восстановление системы после отказа. Следовательно, снижение времени восстановления будет обусловлено квалификацией наладчика. Одним из перспективных направлений диагностики отказов является применение автоматического поиска неисправностей в системах станков с ЧПУ.

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

Интенсивность отказов—условная плотность вероятности отказа устройства в некоторый момент времени при условии, что до этого момента отказа не было [20]. Под интенсивностью отказов систем многократного действия, т. е. восстанавливаемых систем, к которым относятся станки с ЧПУ, состоящие из разнородных элементов, будем понимать количество отказов любого элемента системы в единицу времени при условии, что все отказавшие элементы заменяются новыми. Учитывая, что интенсивность отказов для основного рабочего периода является величиной средней, а также учитывая простоту получения по

известным ее значениям других характеристик надежности, целесообразно в качестве основного критерия надежности систем ЧПУ принять интенсивность отказов. По интенсивности отказов легко оценивать все остальные критерии надежности станочных систем, оборудованных ЧПУ, при их проектировании.

Накопление достаточных статистических данных, позволяющих с определенной точностью оценивать интенсивность отказов отдельных узлов, блоков и элементов станков с системами ЧПУ, позволяет учесть ненадежность этих элементов при эксплуатации и проектировании последующих станков и систем ЧПУ. Основной особенностью полученной информации об интенсивности отказов по статистическим данным об отказах является разброс интенсивности отказов. Разброс пределов интенсивности отказов определяется двумя группами факторов. С одной стороны, даже для однотипных узлов и блоков одних и тех же станков и при одних и тех же условиях эксплуатации интенсивность отказов в большой степени зависит от производственных факторов, а именно: от качества применяемых материалов, установочных элементов, технологии производства, организации системы технического контроля. С другой стороны, для однородных по качеству узлов и блоков интенсивность отказов зависит от условий их работы, которые определяются интенсивностью загрузки станков с ЧПУ, нагрузками, возникающими в узлах и блоках, климатическими условиями. Поэтому при определении интенсивности отказов необходимо учитывать эти факторы и рассчитывать минимальное и максимальное значения интенсивности отказов.

Итак, интенсивность отказов есть количество отказов узлов и блоков в единицу времени (при этом все отказавшие элементы заменяются новыми) т. е.

$$\lambda(t) = \frac{n}{t}.$$

Из предыдущего определения средняя наработка на отказ, полученная по среднестатистическим данным об отказах,

$$T_0^* = \frac{T_p}{n}.$$

Таблица 10

Значения интенсивности отказов по узлам и блокам фазовой системы ЧПУ

Узлы, блоки	n	$T_{o\,min}$ в ч	$T_{o\,max}$ в ч	$\lambda_{min} \times 10^{-3}$ в 1/ч	$\lambda_{max} \times 10^{-3}$ в 1/ч
Электронные блоки	211	497,1	629,2	1,589	2,011
Пускорегулирующая аппаратура	260	407,1	504,9	1,980	2,456
Лентопротяжный механизм . . .	163	631,6	834,1	1,198	1,583
Узлы гидросистемы	244	432,6	539,5	1,853	2,311
Механические узлы	186	559,4	720,9	1,387	1,787

Если преобразовать формулу интенсивности в вид

$$\lambda(t) = \frac{1}{\frac{t}{n}}.$$

и заменить знаменатель на среднестатистическую наработку на отказ, получим

$$\lambda^* = \frac{1}{T_o^*}.$$

Следовательно, с учетом достоверности и точности оценки

$$\lambda_{min} = \frac{1}{T_{o\,min}} \quad \text{и} \quad \lambda_{max} = \frac{1}{T_{o\,max}}.$$

В табл. 10 по статистическим данным рассчитаны количественные значения интенсивности отказов узлов и блоков станков с ЧПУ фазовой системы.

Глава VI

Совершенствование конструкций и повышение надежности станков с системами ЧПУ

§ 1. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ С ЧПУ

Мероприятия по повышению надежности могут быть проведены на трех этапах: при проектировании, при производстве и при эксплуатации технических устройств. Первые два этапа рассмотрены в работах по проектированию и изготовлению автоматизированных систем [1, 13, 17, 25].

При внедрении в промышленность станков с числовым программным управлением проблема обеспечения высокой надежности становится все более важной и актуальной. При достаточной сложности системы ЧПУ на нее возлагается и множество ответственных функций, от выполнения которых зависит качество изготовления деталей, точность и безопасность работы этого оборудования. Отчасти невысокая пока надежность станков с системами ЧПУ объясняется недостаточным опытом проектирующих организаций и в ряде случаев несовершенством технологии изготовления и методов эксплуатации.

Наибольшее распространение числовое программное управление получило во фрезерных, сверлильных, координатно-расточных, электроэррозионных и токарных станках. Разнообразные станки и системы ЧПУ, широко применяемые в промышленности, полностью не удовлетворяют возрастающие потребности производства как по количественным, так и качественным показателям. Особо следует рассмотреть такие качественные показатели, как надежность в работе и эксплуатационные возможности станков. Основной метод создания надежной системы заключается в тщательной разработке конструкции. В некоторых случаях это легко достижимо, а в других — пред-

ставляет большую трудность. Это осуществимо, если в распоряжении конструктора имеются узлы и элементы, составляющие конструкцию, аналогичную проектируемой, и они обладают достаточной надежностью, работоспособностью и выполняют возлагаемые на них функции. Поиски способов получения надежных систем, узлов и блоков станков с ЧПУ — одна из наиболее важных задач обеспечения высокой надежности. Обычно для обеспечения требуемой надежности применяют следующую методику: 1) статистический анализ работы систем и станков с определением наиболее ненадежных узлов и элементов; 2) разработка новых схемных и конструктивных решений, повышающих надежность систем и станков; 3) доработка систем и станков.

Анализируя статистический метериал по отказам при эксплуатации станков с системами ЧПУ, можно установить несколько основных видов отказов, когда происходит полная или частичная потеря работоспособности станка или системы. Проведенный статистический анализ по двум группам станков с ЧПУ показал, что около 30—50% отказов происходит за счет дефектов проектирования и изготовления и 30—40% за счет неправильности эксплуатации.

Исследуя причины отказов станков с ЧПУ, надо отметить, что наибольшее число их падает на пускорегулирующую аппаратуру, гидросистему, электронные блоки, лентопротяжный механизм, механические узлы и на отказы по магнитной ленте.

Характерно, что отказы по пускорегулирующей аппаратуре происходят из-за выхода из строя таких элементов, как пускатели, реле, шаговые двигатели, элементы блоков питания, датчики обратной связи и другие элементы.

Исследуя причины отказов по гидросистеме, необходимо отметить, что большинство отказов происходит из-за разрегулировки сочленения золотника с электромеханическим преобразователем, падения давления в основном и подпиточном насосе, разрегулировки предохранительных и обратных клапанов, заклинивания управляющих золотников, засорения механическими частицами магистралей и фильтров гидросистемы, нарушения температурного режима рабочей жидкости, вспенивания масла и т. п.

Для отказов по электронным блокам характерным является то, что выходят из строя транзисторы входных

усилителей и усилителей мощности из-за колебаний напряжения сети, несогласованности сопротивления магнитной головки с входным сопротивлением усилителей считывания и, как следствие, падения уровня сигнала при считывании информации с магнитной ленты. Схемные решения в реальных схемах систем ЧПУ могут иметь такой недостаток: схема усилителя-ограничителя в фазовой системе ЧПУ изменяет фронты сигналов в зависимости от амплитуды входного сигнала.

Характерным для электронных устройств является и то, что при замене вышедших из строя элементов вновь требуется подбор режима и выходных параметров схемы.

Отказы лентопротяжного механизма характеризуются разрегулировкой прижима магнитной ленты, загрязнением магнитной головки и прижима ферромагнитными и другими частицами, растяжением ведущих пасиков, и как результат, нестабильной работой привода лентопротяжного механизма. Вследствие неточной установки магнитной головки, конструкция крепления которой выполнена недостаточно надежно, в процессе эксплуатации возможно произвольное смещение головки; момент смещения головки предусмотреть невозможно. При настройке силы прижимного ролика тон-вала и изменения толщины магнитной ленты в процессе работы также возможны отказы.

Появление люфтов в механических передачах датчиков обратной связи (вращающихся трансформаторов, редусинов, тахогенераторов) и зазоров в силовых передачах характерно для механических повреждений; поломка шпилек, соединяющих датчики обратной связи, или валов тахогенераторов характеризует внезапные отказы механических узлов.

Программоноситель на магнитной ленте также может быть причиной отказов, например при исчезновении сигнала, вследствие обрыва, надрыва и загрязнения магнитной ленты.

§ 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ

Точность обработки и надежность работы станка с системой ЧПУ, работающего от программы, записанной на магнитной ленте, зависит от того, насколько точно считана информация с магнитной ленты при ее вводе в систему.

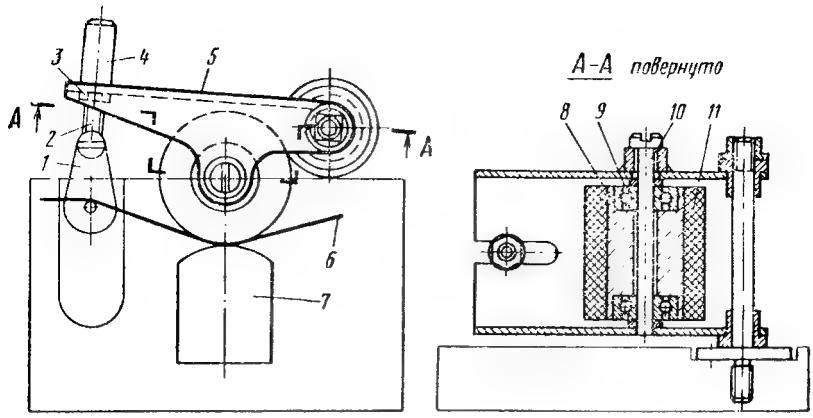


Рис. 98. Конструкции вращающегося прижима

Одним из основных факторов, влияющих на точность и надежность воспроизведения числовой информации, является неполный контакт между магнитной лентой и магнитной головкой. Для устранения этого недостатка применяют специальный прижим магнитной ленты к сердечнику головки при помощи рычага и пластины с наклеенным на ней кусочком фетра. Но такой прижим имеет недостаток, он оказывает тормозящее действие на движущуюся ленту, чем ухудшает условие равномерного протягивания ее. При такой конструкции прижима необходима частая смена фетра из-за быстрого износа. Это объясняется тем, что фетровый прижим неподвижен относительно движущейся ленты. Кусочек фетра, примененный в прижиме, быстро забивается частицами ферромагнитного слоя магнитной ленты, уплотняется, становится жестким, ухудшая при этом надежное и равномерное прилегание ленты к магнитной головке по ширине ленты. К недостаткам фетрового прижима необходимо отнести и частые обрывы магнитной ленты, увеличенный износ магнитных головок и невозможность плавной регулировки силы прижима по всей ширине магнитной ленты. Рассмотренный прижим применен в лентопротяжных механизмах станков модели 6Н13-ГЭ2, ГФ-770, 6Н13-Ф3, 1К62-Ф3 и др. Для устранения недостатков такого типа прижима можно применить для этих же моделей станков вращающийся прижим, показанный на рис. 98. Вращающийся прижим состоит из ролика, который имеет металлическую втулку *8*,

покрытую губчатой резиной *11*. Ролик вращается на подшипниках *9* неподвижной оси *10*, закрепленной на коромысле *5*, которое соединено с рычагом прижима. Работает вращающийся прижим следующим образом: под действием рычага *1* прижима, через коромысло, ролик прижимает магнитную ленту *6* к магнитной головке *7* и деформируется. Тяга *2*, связанная шарнирно с рычагом *1* при помощи гайки с накаткой *4* и контргайки *3*, дает возможность регулировать величину силы прижима ленты к магнитной головке. При движении ленты вследствие сил сцепления между магнитной лентой и губчатой резиной вращающегося прижима ролик начинает вращаться, обеспечивая при этом надежное и равномерное прилегание магнитной ленты к магнитной головке. Преимуществом вращающегося прижима является устранение тормозящего действия на движущуюся магнитную ленту. Прижим не требует частой смены, так как легко промывается от загрязнения. За счет губчатой резины он обеспечивает надежное и равномерное прилегание магнитной ленты к магнитной головке по всей ширине ленты. Применение такого прижима уменьшает износ магнитных головок в 4 раза. Если магнитную головку с фетровым прижимом необходимо снимать и перешлифовать через три месяца, то срок службы магнитной головки с вращающимся прижимом увеличился до года без перешлифовки.

При стабилизации скорости протягивания и устранении детонации магнитной ленты необходимо применять вращающиеся направляющие втулки и ролики. Для обеспечения минимального биения направляющие втулки и ролики, собранные на специальной и точно изготовленной оправке, шлифуют в центрах на шлифовальных станках. Для обработки губчатой резины прижимного ролика, ролик в сборе (вместе с покрытой губчатой резиной втулкой и подшипниками) надевают на оправку и шлифуют в центрах на шлифовальных станках. После шлифования ролик в сборе промывают и ставят на место.

Как рассматривалось ранее, неточное изготовление магнитных головок приводит к амплитудным и фазовым искажениям воспроизводимых сигналов. Величина этих искажений находится в прямой зависимости от перекоса щели магнитной головки. Принятое конструктивное крепление магнитных головок на станках с ЧПУ с пультами управления ПФСТ-12-500 требует очень тщательной установки головки, которая из-за неудачного крепления

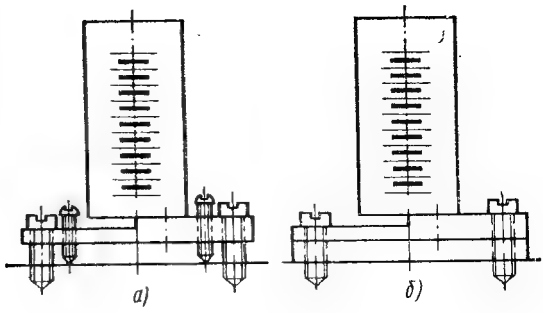


Рис. 99. Крепление магнитной головки:

а—до изменения конструкции; *б* — после изменения конструкции

в процессе эксплуатации может менять свое положение, что приводит к искажению и потере сигнала. Обычное крепление магнитной головки изображено на рис. 99, *а*. Простая и надежная конструкция крепления магнитной головки получается при установке ее на шлифовальную подложку (пластину) с жестким закреплением на плите лентопротяжного механизма так, как это изображено на рис. 99, *б*.

Для станков с ЧПУ находят применение главным образом многоканальные (многодорожечные) магнитные головки, работающие с широкими магнитными лентами. Для станков с фазовой системой ЧПУ типа ФП-7, ФП-17, ПФП-5, 6М13-ГН1, ФП-9 и др. применена магнитная девятидорожечная головка типа ПФП-1 для магнитной ленты шириной 35 мм. Девятидорожечная головка имеет для рассматриваемых станков излишнее количество каналов.

Основной трудностью изготовления таких магнитных головок является обеспечение идентичности отдельных каналов (головок), выполнение одинаковых рабочих щелей и обеспечение требуемого уровня чувствительности. Для усреднения и увеличения сигнала, считываемого магнитной головкой, используют запись одного и того же сигнала на двух дорожках и последовательное включение обмоток двух головок. При настройке головки ПФП-1 в резонанс два таких канала развивают сигнал в 12—15 мВ на частоте 250 Гц. Такая попарно-симметричная схема соединения обмоток головок, применяемая на станках с фазовой системой ЧПУ, изображена на рис. 100, *а*.

При воспроизведении максимальный магнитный поток будет пронизывать сердечник магнитной головки, когда угол между записанной информацией и кромкой ленты

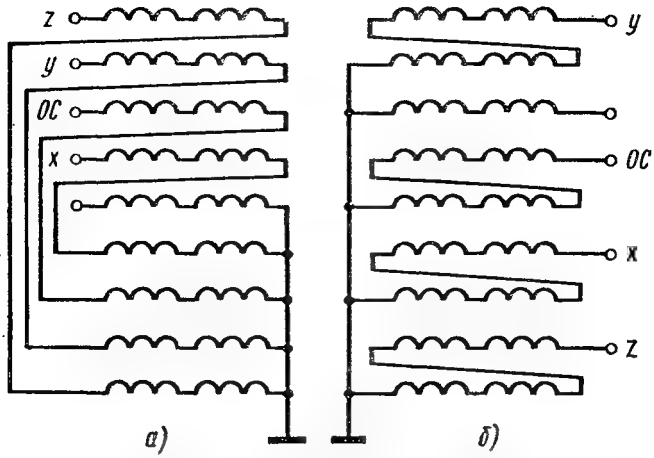


Рис. 100. Схемы соединения обмоток магнитной головки:
а — попарное симметричное; *б* — попарное

(если она была записана параллельно кромке) $\theta = 90°$. Неправильная ориентация рабочего зазора считывающей головки по отношению к направлению движения ленты (если угол $\theta \neq 90°$) служит одной из причин уменьшения сигнала с магнитной ленты. При попарно-симметричном включении обмоток головок любое изменение этого угла будет еще в большей мере уменьшать сигнал, так как суммарная э. д. с. с обеих головок будет меньше, а если угловое смещение создаст сдвиг между двумя дорожками на половину полуволны сигнала, то в этом случае магнитные потоки будут наводить в обмотках противоположные по направлению э. д. с., а так как обмотки соединены последовательно, то при этом на выходе головки сигнал будет отсутствовать.

Для улучшения условий считывания и для уменьшения влияния изменения угла может быть применена иная попарная схема соединения обмоток головок. Такая попарно-последовательная схема соединения изображена на рис. 100, *б*. Эта схема, помимо сокращения влияния перекосов и двухкратного увеличения уровня считываемого сигнала, дает также некоторое увеличение стабильности уровня этого сигнала за счет того, что случайные колебания чувствительности ленты имеют большую неравномерность в направлении ее движения, чем при считывании сигналов с двух дорожек одновременно [19].

Для фазовых систем ЧПУ с целью увеличения сигнала считывания с магнитной головки применяют настройку ее в резонанс, но вследствие того, что частота по управляющим каналам меняется в пределах 250 ± 39 Гц, к вопросу настройки в резонанс необходимо подходить осторожно. Если магнитная головка остро настроена в резонанс на частоту 250 Гц, то отклонение частоты на 40 Гц в сторону уменьшения или увеличения от 250 Гц дает уменьшение сигнала примерно в 2 раза. Поэтому резонансную емкость необходимо подбирать в зависимости от индуктивности обмоток головок и возможных изменений частоты сигнала.

§ 3. ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ, ПОВЫШАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ

Повышения надежности систем ЧПУ при их эксплуатации можно добиться как конструктивными, так и схемными методами. Схемные методы объединяют мероприятия по повышению надежности систем путем совершенствования их принципиальных схем. Совершенствование электронных схем ведется по двум направлениям: 1) создание более простых схем; 2) создание схем с широкими допусками на параметры элементов и внешние воздействия [13, 20, 27, 36].

Схемные методы повышения надежности относятся к числу важных и перспективных. Создание возможно более простых схем относится к числу наиболее трудных вопросов проектирования систем ЧПУ. Создать сложную систему значительно проще, чем выполняющую те же задачи простую схему. Значение упрощения схем определяется тем фактором, что одной из причин возникновения проблемы надежности является сложность современных систем ЧПУ. При этом следует, конечно, иметь в виду, что речь идет о рациональном уменьшении числа элементов системы без ущерба для ее характеристик.

Схемы с широкими допустимыми пределами изменения параметров элементов и внешних воздействий обеспечивают исправность системы даже при применении малостабильных элементов, а также в разнообразных условиях эксплуатации. В процессе эксплуатации на электронные системы станков с ЧПУ действуют случайные нагрузки, которые приводят к изменениям параметров элементов системы, т. е. всегда имеется некоторая вероятность

появления значительных изменений параметров системы, элементов и их эксплуатационных нагрузок. Схемы с широкими допусками на параметры элементов и внешние нагрузки особенно важны в устройствах для переработки информации систем числового программного управления. В этих устройствах случайные колебания напряжения питания, входных сигналов (по частоте и амплитуде) или обратимые изменения параметров элементов при колебаниях температуры и влажности могут привести к трудно обнаруживаемым скрытым отказам, состоящим в потере импульсов, возникновению ложных сигналов или к изменению по фазе сигналов управления. Для создания схем с широкими допусками на параметры элементов устройства и внешних нагрузок иногда целесообразно идти на увеличение числа элементов в системе и усложнение электронных схем.

Возможность осуществления таких схем можно показать на примерах, которые были выполнены на эксплуатируемых системах ЧПУ для повышения их надежности. При снятии осциллограмм с усилителя считывания в пультах управления типа ПРС-3К станка с ЧПУ было замечено, что питающее напряжение входных цепей имеет низкую фильтрацию (рис. 101, *а*), причем при считывании информации с программоносителя пульсация напряжения приводила к внезапным отказам. Одновременно с этим было установлено, что усилитель-формирователь прямоугольных импульсов при колебаниях напряжения сети изменяет амплитуду сигнала и происходит сбой

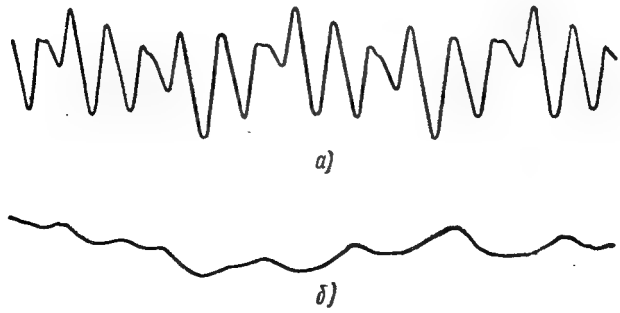


Рис. 101. Осциллограмма напряжения питания импульсной системы ЧПУ:

а — до переделки блока питания; *б* — после доработки блока

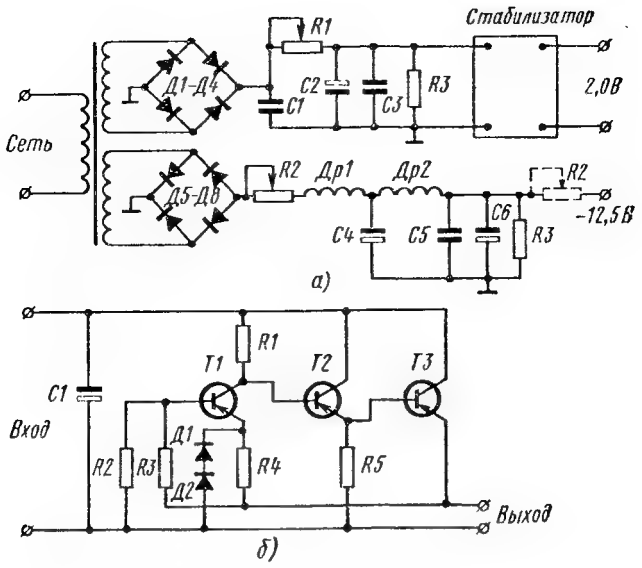


Рис. 102. Схема блока питания системы ЧПУ:

а — после доработки; *б* — схема стабилизатора на 2 В; *Т1, Т2* (МП-15А), *Т3* (П217А) — транзисторы; *Д1, Д2* (Д808) — стабилитроны; *R1* (510 кОм), *R2* (1,8 кОм), *R3* (270 Ом), *R4, R5* (100 Ом) — резисторы; *С1* (1000 мкФ) — конденсатор

в системе управления приводом. Для устранения этих недостатков была изменена схема питания электронных цепей; сопротивления *R*2 с выхода фильтра — 12,5 В переставлено на вход и введен стабилизатор в цепи питания смещения усилителя-формирователя. Измененная схема источника питания приведена на рис. 102, *а* и *б*. После проведенных изменений в схеме источника питания пульсация снизилась и имеет вид, изображенный на рис. 101, *б*.

При измерениях уровня сигнала со считывающей головки в станках импульсной системы обнаружено, что различные типы магнитных лент «отдают» различные уровни сигналов (табл. 11). Верхний предел этого сигнала составляет 6—7 мВ действующего значения на частоте 2500 Гц при осуществлении записи на участке новой ленты, не использованной для записи. При подключении различных магнитных головок к усилителям считывания, которые заменяются по мере износа в процесса эксплуа-

Таблица 11

Механические и магнитные свойства магнитных лент

Параметр	Тип магнитной ленты						
	СССР					ГДР	
	2	6	2ВТ	Сигма	Мороз-335	CR-50	CR-35
Средняя относительная чувствительность в дБ	±1,5	±1,0	±1,0	±1,0	±1,0	±0,5	±1,0
Неравномерность чувствительности в пределах рулона в дБ	±1,5	±1,0	±2,0	±1,5	±1,0	—	—
Относительная частотная характеристика при скорости 3,81 см/с в дБ	0	7,0	—	—	—	3,5	6,5
Нелинейные искажения (не более) в %	2,5	2,5	4,0	—	—	—	—
Относительный уровень копир-эффекта (не более) в дБ	—49	—49	—49	—48	—	—55	—50
Усилие разрыва (не более) в кгс/мм² . . .	2,4	2,4	5,0	5,0	12,0	2,6	1,4
Полное относительное удлинение при нагрузке 1 кгс в%	1,5	1,5	0,5	0,8	—	1,1	2,3
Общая толщина в мкм	55	55	120	85	37	50	35
Толщина рабочего слоя	16	16	22	12	8	15,5	14,5
Материал основы	ДЦ	ДЦ	ТЦ	ТЦ	Л	ДЦ	ДЦ

тации, сигнал, считанный с магнитной ленты, иногда может падать до 1,5—2,0 мВ. Это объясняется тем, что заменяемые головки имеют разброс по размерам рабочей щели и количеству витков обмотки головки. Коэффициент передачи в системе головка—магнитная лента соответствует примерно 0,3. Одновременно с этим многоразовая прогонка и длительное хранение магнитных лент также приводят к падению уровня сигнала. Причиной падения уровня является то, что магнитная лента теряет свои магнитные свойства от времени использования и износа. Надежность считывающих устройств может быть увеличена за счет чувствительности системы: увеличением коэффициента усиления усилителя считывания, увеличением сигнала на магнитной ленте, повышением коэффициента передачи магнитная лента—магнитная головка или магнитная головка—усилитель.

При длительном хранении магнитных лент уровень сигнала с ленты падает в 2—2,5 раза, что неизбежно в условиях производства, так как обработка деталей связана с какой-то цикличностью и время хранения лент может колебаться от одного до нескольких месяцев. Одновременно со «старыми» магнитными лентами в производстве используются и новые ленты разных типов с записанными на них программами. В общем случае при длительном хранении магнитных лент, их износе и использовании различных типов лент величина считываемого с магнитной ленты сигнала будет в пределах 2—7 мВ. Очевидно, что усилители, настроенные на чувствительность 6—7 мВ, не будут воспроизводить сигналы с уровнем 2 мВ и меньше, а если усилитель настроен на уровень 2 мВ, то при уровне сигнала 6 мВ усилитель оказывается не работоспособным, так как одновременно с увеличением основного сигнала увеличивается и сигнал помехи, который при дальнейшем усилении достигает величины основного сигнала и система станка становится неработоспособной.

Для того чтобы устранить влияние разброса параметров магнитных головок и при этом увеличить коэффициент передачи, можно ввести в первый каскад схемы усилителя считывания эмиттерные повторители. При замене магнитных головок вследствие разброса обмоточных данных меняется сопротивление обмоток головок. При уменьшении сопротивления головки первый каскад усилителя считывания нагружен малым внутренним сопротивлением головки, и коэффициент усиления усилителя будет меньше,

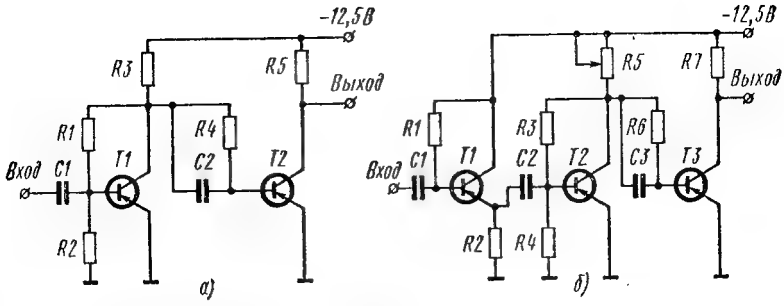


Рис. 103. Схема усилителя считывания:
а — до изменения схемы; *T1*, *T2* (МП41А) — транзисторы; *R1* (100 кОм), *R2* (10 кОм), *R3* (572 кОм), *R4* (68 кОм), *R5* (5,1 кОм) — резисторы; *C1—C3* (0,1 мкФ) — конденсаторы; *б* — после изменения схемы; *T1—T3* (МП41А) — транзисторы; *R1* (100 кОм), *R2* (5,1 кОм), *R3* (110 кОм), *R4* (10 кОм), *R5* (5,1 кОм), *R6* (68 кОм), *R7* (5,1 кОм) — резисторы; *C1—C3* (0,1 мкФ) — конденсаторы

а следовательно, и сигнал, считываемый магнитной головкой, изменится в сторону уменьшения. Замена входных цепей усилителя считывания на эмиттерные повторители позволяет согласовать вход усилителя считывания с выходным сопротивлением магнитных головок. Так, например, для системы управления станками типа 6Н13-ГЭ2 с пультами ПРС-3К была произведена доработка схемы входных усилителей (рис. 103) с вводом в нее эмиттерных повторителей. Изменение схемы позволило увеличить коэффициент передачи до 0,7—0,8 и устранить влияние разброса параметров магнитной головки. Одновременно с вводом эмиттерных повторителей, во второй каскад усилителя считывания в коллекторную цепь транзистора было введено переменное сопротивление, с помощью которого можно осуществлять изменение коэффициента усиления усилителя считывания. Но такой путь не решает полностью этого вопроса. Ввод переменного сопротивления во второй каскад усилителя считывания позволяет настраивать усилители под любой сигнал, считываемый с магнитной ленты. Настройку коэффициента усиления усилителя может производить вручную специалист — наладчик, измерительными приборами, а это при частой смене магнитных лент с различными уровнями записи сигналов вызывает неудобство и большие затраты времени при эксплуатации систем с ЧПУ.

Считываемый сигнал с магнитной ленты изменяется примерно в 2—2,5 раза. Это обстоятельство делает необхо-

димым введение в цепи усилителей считывания схемы автоматического регулирования усиления (АРУ). На рис. 104 и 105 приведены схемы АРУ, которые могут быть применены в системах станков с ЧПУ. На рис. 104 показана схема регулирования коэффициента усиления транзистора *Т1* с помощью внешнего сигнала ($u_{упр}$). При отсутствии $u_{упр}$ сопротивление резистора в цепи обратной связи *R4* шунтируется емкостью *С2* и сопротивлением диода *Д1*. Обычно применяют кремниевый диод, так как он обладает большим сопротивлением на начальном участке своей вольт-амперной характеристики. Глубокая отрицательная связь достигается путем включения резистора *R4* с относительно большим сопротивлением (500—1000 Ом).

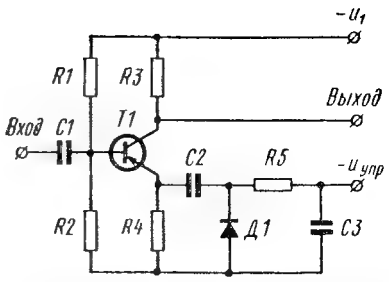


Рис. 104. Принципиальная схема АРУ с изменением прямого сопротивления диода

При подаче управляющего сигнала $u_{упр}$ через диод *Д1* протекает ток, определяемый сопротивлением резистора *R5* и напряжением $u_{упр}$. Вследствие этого снижается прямое сопротивление диода *Д1*, т. е. диод переводится из режима запирания в режим пропускания, и уменьшается глубина обратной связи на транзисторе *Т1*. Регулируя напряжение $u_{упр}$, можно изменять прямое сопротивление диода *Д1* и тем самым глубину обратной связи для поддержания коэффициента усиления в требуемых пределах. Величину $u_{упр}$ (0,5—0,86) для регулирования коэффициента усиления транзистора *Т1* выбирают заранее, в за-

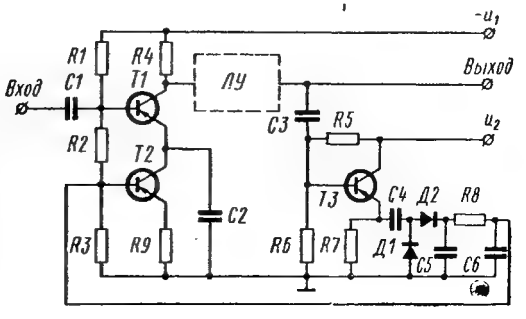


Рис. 105. Принципиальная схема АРУ с изменением динамического сопротивления транзистора

висимости от типа применяемой магнитной ленты, срока ее хранения и длительности использования. Для каждой группы этих параметров устанавливается дискретное значение $u_{упр}$. Значение $u_{упр}$ при переходе от одной магнитной ленты к другой устанавливается оператором, работающим на станке с ЧПУ. Сопротивления *R1* и *R2* выбирают из условия определения рабочей точки транзистора *T1*. Величина емкости *C2* зависит от типа диода *Д1* и напряжения управления $u_{упр}$ и выбирается от 1 до 10 мкФ. Сопротивление *R5* подбирается из условий ограничения тока, протекающего по диоду на начальном участке вольтамперной характеристики, и $u_{упр}$. Для диодов типа Д101—Д105 сопротивление может быть от 40 до 100 кОм.

На рис. 105 приведена схема АРУ, в которой коэффициент усиления изменяется в зависимости от амплитуды входного сигнала. Транзистор *T1* служит одним из каскадов линейной части усилителя. В цепь его эмиттера включен транзистор *T2*, работающий как регулятор динамического сопротивления. Величина этого сопротивления зависит от амплитуды входного сигнала. Сигнал с выхода линейных каскадов усилителя считывания (*ЛУ*) подается на вход эмиттерного повторителя *T3*, с выхода которого поступает на вход детектора, выполненного на диодах *Д1* и *Д2*. В зависимости от этого напряжения изменяется динамическое сопротивление транзистора *T2* и, в конечном итоге, коэффициент транзистора *T1*. На магнитной ленте перед началом рабочей информации записывают серию управляющих импульсов. Постоянную времени интегрирующей цепи (*R8* и *C6*) выбирают так, чтобы управляющее напряжение, поступающее на вход транзистора *T2*, обеспечивало поддержание требуемого коэффициента усиления усилителя.

В гл. II указывалось, что недостатком усилителя-ограничителя в фазовой системе ЧПУ является то, что при изменении амплитуды входного сигнала изменяются фронты входного сигнала, что отрицательно влияет на работу последующих каскадов и, в частности, на работу статического триггера. Чтобы исключить возможность появления отказов в схеме фазового управления станком, можно изменить схему усилителя-ограничителя на схему триггера Шмитта (рис 106). Триггер Шмитта является регенеративной схемой, которая скачком изменяет свое состояние, когда входной сигнал достигает определенной величины. Основное применение триггера Шмитта — это

формирование прямоугольных импульсов из входного сигнала синусоидальной формы. Рассмотрим работу схемы. Если напряжение на входе $u_{вх}$ равно нулю, то предположим, что транзистор *T1* закрыт, а *T2* открыт. Напряжение на эмиттерах транзисторов будет $u_э > 0$, так как транзистор *T2* открыт. Если $u_{вх}$ превышает сумму $u_э + u_{бэ}$ (напряжение база — эмиттер), транзистор *T1* открывается, напряжение на его коллекторе уменьшается, $u_э$ увеличивается. Это изменение будет уменьшать ток базы транзистора *T2* так, что транзистор *T2* выходит из насыщения. Уменьшение тока $I_{к2}$ приводит к уменьшению $u_э$, что приводит к увеличению тока базы $I_{б1}$. Оба транзистора находятся в активной области, и в схеме происходит регенеративный процесс. Регенерация продолжается до тех пор, пока транзистор *T1* не перейдет в открытое состояние, а транзистор *T2* — в закрытое. Заметим, что $u_э$ сейчас меньше, чем в первоначальном состоянии, так как $R2 > R5$. Поэтому напряжение точки обратного перехода также будет меньше. Эти две точки называются верхней и нижней точками переброса. Различие в точках переключения обеспечивает релейное действие схемы, что увеличивает ее помехозащищенность. Когда напряжение $u_{вх}$ падает до нижней точки переброса, происходит обратный процесс, и схема возвращается в свое первоначальное состояние.

При исследовании входных цепей усилителей считывания в импульсной системе ЧПУ было обнаружено, что выходные силовые цепи сильно влияют на входные цепи усилителей считывания. Было также установлено, что это влияние происходит в схемах управления по координатам станка. Так, при снятии осциллограмм непосредственно с магнитной головки при отключенной схеме управления по координатам сигналы имеют правильную не искаженную форму. При подключении схемы управления упра-

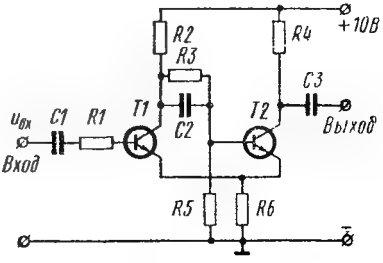


Рис. 106. Принципиальная схема усилителя-ограничителя (триггер Шмитта):

T1, T2 — транзисторы МП-11; *R1, R2* (1,3 кОм), *R3* (6,8 кОм), *R4* (1 кОм), *R5* (240 Ом), *R6* (8,2 кОм)— резисторы; *C1* (1 мкФ) *C2* (270 мкФ), *C3* (0,025 мкФ) — конденсаторы

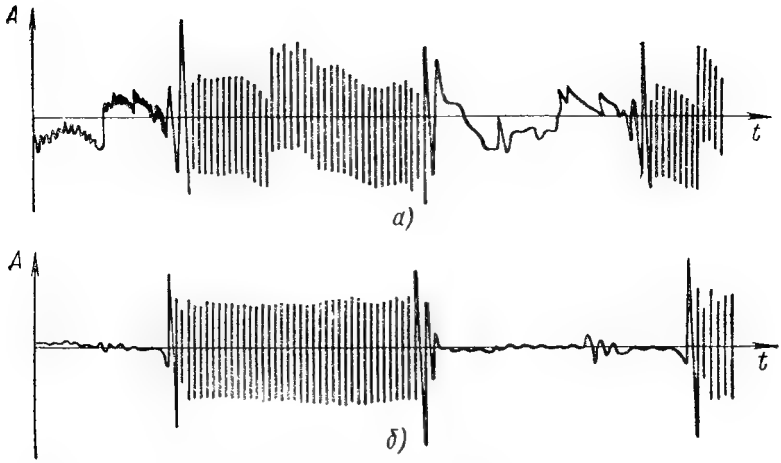


Рис. 107. Осциллограмма сигналов управления:

а — до разделения цепей; *б* — после разделения цепей (*А* — амплитудное значение; *t* — время)

вляющие сигналы искажают свою форму. Эти искажения, пройдя канал усиления, не устраняются, а остаются на управляющем сигнале и имеют вид, изображенный на рис. 107, *а*. Такой искаженный сигнал является причиной отказов системы управления станком. Очевидным фактором этого явления было влияние выходных цепей на входные, которые были связаны общими цепями по питанию. Общим для этих цепей был плюсовой проводник. При разделении этих общих цепей, т. е. когда плюсовые цепи усилителей считывания и выходных каскадов были разделены, управляющие сигналы получили неискаженную форму (рис. 107, *б*).

По-видимому, возможны и другие схемные методы повышения надежности эксплуатируемых систем. Например, ведутся поиски путей создания схем с принципиально надежной логической структурой.

§ 4. ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОУЗЛОВ СТАНКОВ С ЧПУ

Повышению надежности гидросистем в последнее время уделяется достаточно серьезное внимание. Эта задача решается как повышением качества проектирования и изготовления, так и проведением необходимых доработок в процессе их эксплуатации. Работы по созданию надеж-

ных гидроузлов должны начинаться с определения необходимого уровня надежности, при этом каждому узлу или агрегату устанавливаются показатели надежности исходя из важности выполняемых функций. В качестве исходных данных могут быть использованы статистические данные об отказах находящихся в эксплуатации узлов и агрегатов. Принятые уровни надежности должны быть обеспечены в процессе эксплуатации при помощи правильной и своевременной профилактической работы или проведения схемных и конструктивных изменений узлов и блоков, поддерживающих данный уровень надежности. Опыт эксплуатации многих станков с ЧПУ показал, что низкие температуры окружающего воздуха для рабочей жидкости, находящейся в гидросистеме станка, в меньшей степени оказывают нежелательное действие, чем высокие температуры. Основная масса рабочей жидкости, находящейся в баке, имеет первоначальную температуру 10—15° С, обусловленную температурой окружающего воздуха. В дальнейшем при работе гидросистемы жидкость постепенно нагревается. Для лучшего температурного режима жидкости обычно включают гидронасосы и гидродвигатели на некоторое время без обработки детали. Таким образом, к моменту начала обработки по программе температура жидкости оказывается выше 15—20° С, что обеспечивает нормальную работу гидропередачи. Температура жидкости может быть поднята и за счет специальных нагревателей, введенных в масляный бак, например тенов.

Повышение температуры масла объясняется выделяемым теплом в самой гидросистеме за счет трения или при изменении температуры окружающего воздуха. Для уменьшения выделяемого тепла в станках с ЧПУ, выпускаемых Горьковским заводом фрезерных станков, в масляные баки введены радиаторы естественного охлаждения. Но при увеличении силы резания при обработке деталей, увеличении трения в кинематических цепях и направляющих станка изменяется нагрузка на гидропривод, количество выделяемого тепла в системе увеличивается, и существующая система охлаждения масла не обеспечивает нормального температурного режима. Поэтому целесообразно вводить принудительное охлаждение масла в гидросистемах станков.

При исследовании отказов в гидросистемах станков моделей 6Е13-ГЭ2, ГФ-770 и ФП-4 было выяснено, что температурный режим масла в гидросистемах превышал

допустимый и в летний период достигал 60—70° С, что приводило к заклиниванию золотников и нарушению работы станка. Для устранения отказов и снижения температуры масла в сливные баки была введена дополнительная система охлаждения, состоящая из змеевика с проточной водой, при этом температура масла была снижена до 35—40° С, что ликвидировало отказы гидроаппаратуры и улучшило работу гидросистем.

Загрязнение рабочей жидкости частицами, пылью, стружкой и другими примесями снижает надежность и срок службы (иногда в 10 раз) гидроагрегатов, причем от качества фильтрации (очистки) масла зависит износ и надежность гидросистем станков с ЧПУ. Отделение от жидкостей твердых загрязняющих примесей осуществляется механическими или силовыми методами. В первом случае фильтрация производится различными щелевыми и пористыми фильтрующими элементами, а во втором — магнитными и электрическими полями. В гидравлических системах станков с ЧПУ применяют в основном первый метод очистки рабочей жидкости и в качестве фильтрующих элементов — проволочные фильтры. Фильтрующий элемент проволочных фильтров изготовляют из проволоки круглого или трапециевидного сечения, которая навивается на цилиндрический каркас, имеющийся на поверхности окна. Проволоку при навивке на цилиндр укладывают либо в винтовые канавки с шагом, обеспечивающим заданный зазор между витками, либо навивают виток к витку вплотную, а зазор между витками (фильтрующую щель) обеспечивают тем, что на проволоке выполняют местные утолщения или выступы. Минимальный размер фильтрующего зазора в таких элементах составляет 0,04—0,05 мм. Применение проволочных фильтров в гидросистемах станков с ЧПУ не обеспечивает полностью очистку рабочей жидкости от загрязнений. Наиболее целесообразно применять в гидросистемах станков с ЧПУ фильтры с наполнителями (фильтроэлементами) из пористых металлов и керамики. Обычно такие фильтроэлементы изготовляют прессованием или выдавливанием в виде дисков или пластин. Фильтр с фильтроэлементами пластинчатой конструкции изображен на рис. 108. Керамический фильтрующий элемент *1*, примененный в данной конструкции фильтра, хорошо противостоит изменению температуры и обладает хорошими фильтрующими свойствами. Он отфильтровывает частицы размером 15—20 мкм.

Существуют две схемы фильтрации: 1) фильтруют весь поток жидкости; фильтр включают последовательно потоку; 2) фильтруют только часть потока; фильтр устанавливают параллельно потоку. Вторая схема применяется в тех случаях, когда необходимо особенно тщательно очищать рабочую жидкость, например в управляющих элементах-золотниках, где радиальные зазоры очень малы. В гидросистемах станков с ЧПУ целесообразно применять одновременно обе схемы фильтрации. Опыт показывает, что при установке фильтров грубой очистки в линии всасывания насосов повышается срок службы насосов. Если фильтр устанавливают на внутренней линии нагнетания, непосредственно после насоса, то такая установка имеет также свои преимущества. Поскольку основным источником внутреннего загрязнения является сам насос, то установка фильтра после насоса предохраняет от повреждений управляющие и регулирующие элементы гидросистемы (золотники, сервоцилиндры, клапаны и гидродвигатели). При установке фильтров в гидросистему станка с ЧПУ необходимо учитывать свойства рабочей жидкости, степень ее загрязнения, влияние установленных фильтров на производительность насосов, гидромоторов и необходимость защиты управляющих и регулирующих элементов гидросистемы станка от загрязнения.

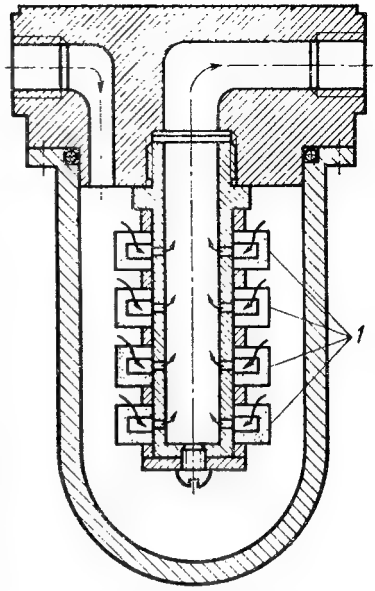


Рис. 108. Фильтр с фильтроэлементами из пористых керамических дисков

Анализ неисправностей насосов и гидромоторов показал, что в большинстве случаев неисправности вызваны нарушениями герметичности уплотнений и появлением недопустимых утечек рабочей жидкости. В качестве примера можно привести выход из строя уплотнения на выходном валу гидродвигателя типа 2,5 привода подачи станка ПФП-5, который выполнен из резины. Причиной

нарушения качества уплотнения явилось повышение температуры рабочей жидкости и наличие трения о вал. В отечественной промышленности в большинстве случаев манжеты уплотнения гидродвигателей этого типа изготовляют из резины на основе бутадиентитрилакриловых каучуков. Наиболее качественные уплотнения можно получить для гидросистем станков с ЧПУ, если для уплотнительных манжет применять резину на основе фторорганических каучуков. Эта резина обладает малой морозостойкостью, но хорошо работает при температурах до 150° С, обладает малой истираемостью и большой эластичностью.

В гидросистемах станков с ЧПУ наиболее распространен разъемный тип соединений трубопроводов, допускающий многократный демонтаж и монтаж элементов системы. При эксплуатации таких соединений необходимо учитывать нагрузки, действующие на соединение из-за неточностей изготовления. В процессе монтажа трубопроводов гидросистемы станка невозможно добиться идеального совпадения торцов труб и штуцеров. Эти монтажные неточности вызывают дополнительные силы, действующие на присоединяемый гидроагрегат, вызывая деформацию трубопровода и самого агрегата. Величина неточностей зависит от характера расположения соединяемых элементов: недотяга, несоосности или перекоса. Закономерности распределения сил, вызываемых монтажными неточностями, определить сложно, поэтому определяют их сумму. Так как неточности возникают в различных плоскостях, то наиболее выгодное расположение их вызывает наибольшее напряжения. Если воспользоваться данными А. А. Комарова и В. М. Сапожникова [21], можно определить допустимые неточности в соединениях трубопроводов. Например, по рекомендациям этих авторов, несоосность для диаметра трубы 10—12 мм допускается в зависимости от длины до 10 мм, недотяг для длины трубопровода до 1500 мм с прямой конфигурацией трубы допускается до 1,0 мм, а для конфигурации трубопровода с одним или несколькими изгибами — до 1,5 мм.

Испытания герметичности станочных гидросистем проводят созданием избыточного давления внутри системы рабочей жидкостью, выдержкой системы под избыточным давлением и последующей оценкой утечек жидкости из системы. Обычно в паспорте на гидроагрегат станка указывается только степень герметичности, а метод контроля в процессе эксплуатации не приводится. Наибольшее

распространение получили следующие методы оценки герметичности: гидростатический (жидкостью), пневматический (с применением мыльной эмульсии), пневмогидравлический (окунанием в жидкость). При испытании герметичности гидроагрегатов станков с ЧПУ наиболее приемлем гидростатический метод контроля герметичности. Испытания герметичности гидроагрегатов рабочей жидкостью проводят после промывки и заправки их чистой жидкостью. Систему заполняют рабочей жидкостью под давлением, соответствующим рабочему, и после определенной выдержки осматривают и протирают (ГОСТ 12026—66). Величину утечки контролируют манометрическим методом (по падению давления в системе) или определяют по количеству выделяющейся жидкости. Внутренняя герметичность гидросистемы станка с ЧПУ оценивается падением давления в системе за счет суммарных утечек из всех гидроагрегатов в сливную магистраль в течение определенного времени. Последовательность операций при испытании на герметичность гидросистем станков следующая: подключение стенда к проверяемой системе; создание заданного давления и прокачивание несколько раз системы; выдержка системы под давлением в течение 1—2 мин; определение времени падения давления по контрольному манометру согласно технической документации на систему; в случае негерметичности последовательная проверка каждого гидроагрегата.

Для удовлетворительной работы электромеханического преобразователя, управляющего перемещением золотника в гидросистеме станка с ЧПУ, необходимо обеспечить соосность осей золотника и сердечника электромеханического преобразователя. При нарушении соосности возможно заклинивание золотника. Другой причиной неудовлетворительной работы системы золотник — преобразователь является разрегулировка соединения и, как следствие этого, уход золотника из нулевого положения, что также приводит к отказам гидросистемы станка с ЧПУ. Выпускаемые промышленностью станки с ЧПУ имеют электромеханические преобразователи, которые соединены с управляющим золотником с помощью жесткой скобы. Неточность изготовления такой скобы или несоосность, полученная при сборке этих элементов, порождают отказы в работе устройства. Чтобы исключить заклинивание и разрегулировку золотника, было разработано новое соединение, позволяющее иметь несоосность сое-

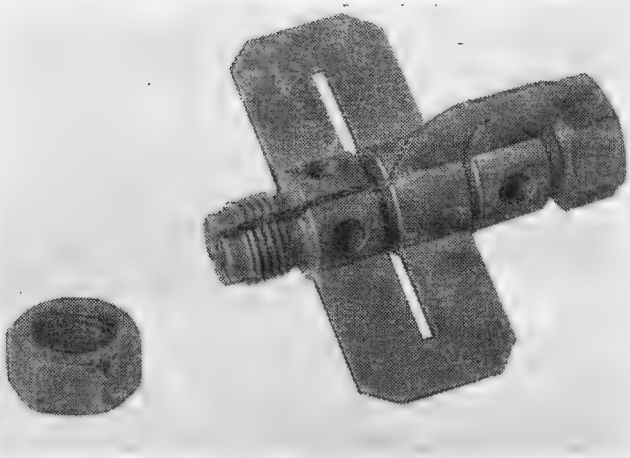


Рис. 109. Гибкая соединительная муфта

диняемых элементов, а также обеспечивающее точную фиксацию положения золотника. Соединение такого типа, изображенное на рис. 109, состоит из двух цанг, центральной втулки и четырех пластин, выполненных из бериллиевой бронзы. Пластины с помощью пайки соединяют все элементы сочленения. Применение такого устройства позволило почти полностью исключить влияние несоосности соединяемых элементов и исключило появление отказов из-за разрегулировки.

Сердечник электромеханического преобразователя в фазовых системах ЧПУ закреплен в мембранах, которые служат элементами подвески. Мембраны жестко закреплены по внешней окружности, а сердечник закреплен в центральной части мембран. Такое крепление сердечника электромеханического преобразователя приводит к поломкам мембран, образованию в них трещин. Вследствие вытяжки мембран у преобразователя меняется характеристика, появляется нелинейность, гистерезис. Все это приводит к тому, что в системе управления гидросистемой станка с ЧПУ появляются отказы и неисправности. Такие неисправности трудно определяются при проверках и испытаниях гидросистем станков с ЧПУ. Разрушение и вытяжка мембран происходят вследствие действия изгибающих сил в процессах перемещения сердечника под влиянием магнитного поля электромеханического преобразователя. Вытяжка или поломка мембран приводит

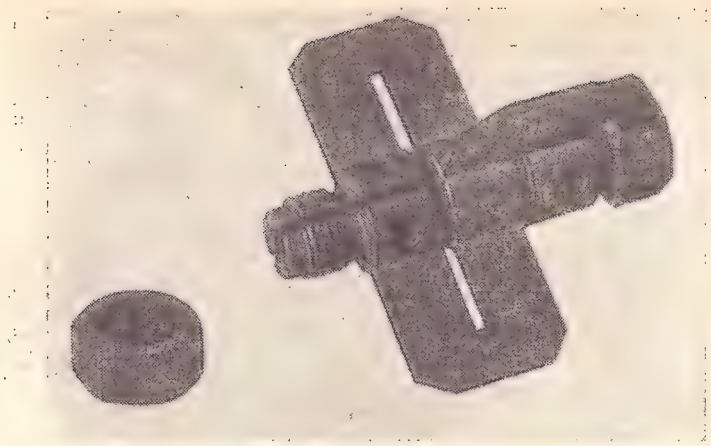


Рис. 109. Гибкая соединительная муфта

диняемых элементов, а также обеспечивающее точную фиксацию положения золотника. Соединение такого типа, изображенное на рис. 109, состоит из двух цанг, центральной втулки и четырех пластин, выполненных из бериллиевой бронзы. Пластины с помощью пайки соединяют все элементы сочленения. Применение такого устройства позволило почти полностью исключить влияние несоосности соединяемых элементов и исключило появление отказов из-за разрегулировки.

Сердечник электромеханического преобразователя в фазовых системах ЧПУ закреплен в мембранах, которые служат элементами подвески. Мембраны жестко закреплены по внешней окружности, а сердечник закреплен в центральной части мембран. Такое крепление сердечника электромеханического преобразователя приводит к поломкам мембран, образованию в них трещин. Вследствие вытяжки мембран у преобразователя меняется характеристика, появляется нелинейность, гистерезис. Все это приводит к тому, что в системе управления гидросистемой станка с ЧПУ появляются отказы и неисправности. Такие неисправности трудно определяются при проверках и испытаниях гидросистем станков с ЧПУ. Разрушение и вытяжка мембран происходят вследствие действия изгибающих сил в процессах перемещения сердечника под влиянием магнитного поля электромеханического преобразователя. Вытяжка или поломка мембран приводит

к изменению электромеханической характеристики преобразователя. Изменение характеристики может привести к нарушению работоспособности и неустойчивой работе гидросистемы станка. Момент начала этих изменений трудно определить при эксплуатации.

Более надежной подвеской сердечника преобразователя может служить конструкция ее, показанная на рис. 110. Мембраны не нагружены, на них не действуют изгибающие моменты, они являются центрирующими шайбами, с помощью которых устанавливается равномерный радиальный зазор между сердечником и электромагнитом. В осевом направлении сердечник устанавливается с помощью цилиндрических пружин *2* и регулировочных гаек *1*. Применение новой конструкции исключило появление отказов в системе управления, надежность гидросистемы увеличилась, кроме того, с точки зрения наладки и регулировки данная конструкция значительно упрощает эти операции.

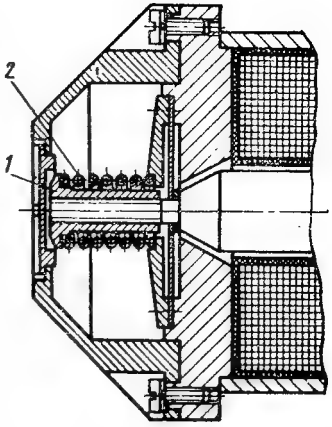


Рис. 110. Подвеска сердечника электромеханического преобразователя с цилиндрическими пружинами

§ 5. КОНСТРУКТИВНЫЕ ДОРАБОТКИ СТАНКОВ С ЧПУ, ПОВЫШАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ

Процесс проектирования станков с системами ЧПУ предопределяет величину надежности этих систем. Однако реализация этой величины в значительной степени связана с организацией производства и эксплуатацией систем. Усилия разработчиков и обслуживающего персонала направлены на повышение надежности оборудования, поэтому при производстве и эксплуатации станков и систем ЧПУ постоянно производятся доработки, повышающие их надежность.

К факторам, снижающим надежность систем ЧПУ и характеризующим недостатки проектирования, можно отнести применение ненадежных элементов, недостатки схемных решений и конструкций узлов и блоков системы.

Например, в станках с фазовой системой в релейной группе были применены электромагнитные реле типа МКУ-48, что снижало надежность пускорегулирующей аппаратуры станка, так как реле этого типа оказались менее надежными, чем реле типа ТКЕ. Замена реле типа МКУ на более надежные серии ТКЕ снизила общее количество отказов по пускорегулирующей аппаратуре примерно на 20—25% и тем самым была повышена надежность станков с ЧПУ. В станках типа ФП-7, ФП-17, 6М13-ГН1 были применены стационарные пульты ручного управления, которые в процессе обработки деталей забиваются металлической стружкой, что приводит к отказам системы станка. Кроме того, применение стационарных пультов уменьшает зону обслуживания станка оператором. Для повышения надежности и удобства обслуживания станков разработаны подвесные пульты управления, которые исключают попадание металлической стружки в пульт и расширяют возможность работы оператора. Подвесной пульт позволяет расширить зону обслуживания станка, имеет возможность регулировки по высоте, что также имеет свои преимущества, так как правильная установка управляемого элемента снижает утомляемость оператора и увеличивает возможности управления.

Как правило, в системах станков для торможения главного привода применяют схему торможения с реле контроля скорости. В первых выпусках станков с ЧПУ была применена такая схема торможения, которая имела существенный недостаток. Наличие в схеме электромагнитного реле контроля скорости, часто отказывающего из-за того, что в зазоры между магнитом реле и его статором набивалась пыль и металлическая стружка, приводило к заклиниванию вращающейся части реле и вызывало отказы в систему правления станком. Была применена новая схема торможения двигателя главного привода (рис. 111), исключившая отказы системы управления станком.

В зависимости от выбранного направления вращения двигателя *Д* переключатель *П* устанавливают в положение *I* или *II*. Если переключатель поставлен в такое положение, как показано на схеме, то при нажатии кнопки «Пуск» включается реле *2РП*, нормально открытые контакты которого замыкают цепь катушки контактора *К1*. Контактор *К1*, включившись, подает напряжение на двигатель *Д*. Одновременно нормально открытый контакт *К1*

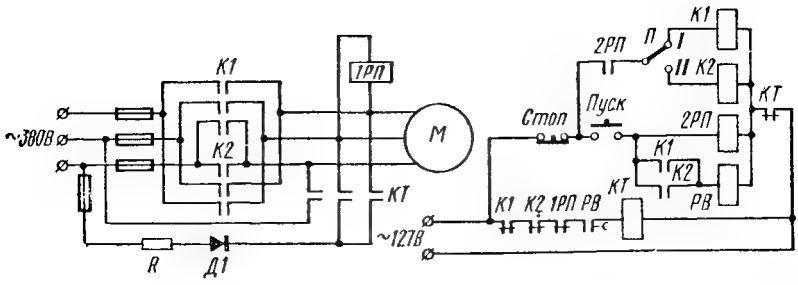


Рис. 111. Принципиальная схема торможения главного привода

включит реле времени *РВ*, контакты которого замыкаются и подготовляют цепь для включения катушки контактора торможения *КТ*. При подаче напряжения на двигатель включается реле *1РП*, которое своими нормально закрытыми контактами разрывает блокировочную цепь контактора *КТ*, так же как это делает контакт *К1*.

При нажатии кнопки «Стоп» отключаются цепи питания двигателя *Д* и реле *1РП*, блокировочные контакты *К1* и *1РП* замыкают цепь катушки контактора *КТ*, который подает напряжение от сети через сопротивление *R* и диод *Д1* на статорную обмотку, и происходит торможение ротора полем постоянного тока. Обмотки двигателя остаются включенными в течение времени срабатывания реле *РВ* на размыкание.

Время торможения определяется типом двигателя и током торможения. Сопротивление *R* и диод *Д1* подбираются по току торможения; например, для двигателя мощностью 20 кВт установлен диод ВК-200 и сопротивление 20 Ом. Применение такой схемы позволило также уменьшить динамическую нагрузку на редуктор главного привода в момент его торможения и тем самым увеличить надежность не только электрической системы, но и механических узлов станка.

Надежность многих электронных схем может быть повышена применением высокостабильных источников питания, обеспечивающих постоянство напряжений при изменении напряжения сети. Полупроводниковые приборы, применяемые в системах станков с ЧПУ, весьма чувствительны к перегрузкам по току и напряжению. Они выходят из строя даже при кратковременных перегрузках, измеряемых долями секунды. Выход их из строя

объясняется колебаниями напряжения в сети питания систем управления станков с ЧПУ. Одной из причин появления внезапных отказов транзисторов в системе является перенапряжение между коллектором и базой, а также между эмиттером и базой, возникающее в момент колебаний напряжения питания этих цепей. Для устранения отказов электронных блоков из-за колебаний напряжения сети был разработан стабилизированный источник постоянного тока для питания электронных схем станка и доработаны системы ЧПУ. Принципиальная электрическая схема стабилизированного источника питания станка ФП-7 приведена на рис. 112. Стабилизация выходного напряжения в данной схеме обеспечивается применением составного эмиттерного повторителя, состоящего из транзисторов *Т1*, *Т2*, и *Т3*. Транзисторы *Т2* и *Т3* включены параллельно для обеспечения необходимой мощности стабилизации. Цепи, состоящие из стабилитронов *Д1* и *Д2*, определяют необходимое напряжение стабилизации. Стабилитрон *Д3* включен в прямом направлении для температурной компенсации схемы. Емкость *С1* и сопротивление *R2* в цепи базы транзистора *Т1* служит фильтром. Как известно, выходное напряжение эмиттерного повторителя не зависит от напряжения на коллекторе, при условии, что это напряжение будет превышать напряжение на базе; выходное напряжение при этом будет определяться коэффициентом передачи эмиттерного повторителя. Следовательно, при изменении напряжения на выпрямителе, которое может изменяться от напряжения сети, на выходе эмиттерного повторителя напряжение будет неизменно.

Благодаря внедрению в системы станков стабилизированного источника питания количество выходов из строя транзисторов уменьшилось в 1,5 раза.

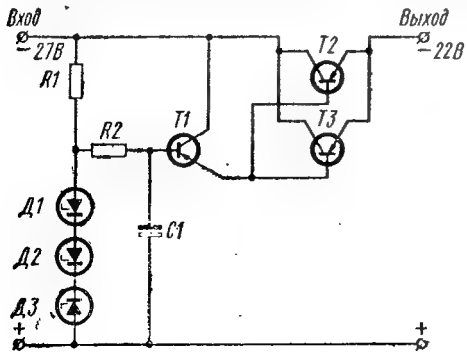


Рис. 112. Принципиальная схема стабилизатора напряжения постоянного тока:

R1 (470 Ом), *R2* (510 Ом) — резисторы; *С1* (500 мкФ) — конденсатор; *Т1* (П-214), *Т2*, *Т3* (П-210) — транзисторы; *Д1*, *Д2* (Д811), *Д3* (*Д808*) — диоды

Качество сборки имеет для надежности систем станков с ЧПУ также весьма важное значение. Даже если детали точно изготовлены, но узлы неудовлетворительно собраны, эти узлы и детали будут влиять на работу системы. Если конструктивно недостаточно продумана сборка узлов, то это может привести к неустойчивой работе системы станка и, больше того, приводит к поломкам отдельных элементов и узлов. Конструктор, как правило, идет по пути упрощения конструкции и тем самым не предусматривает иногда регулировок в механических узлах, которые необходимы при сборке, чтобы получить качественную работу узла или элемента. Особенно это сказывается, когда связывают механический узел передачи с электромеханическим агрегатом, например датчик обратной связи (тахогенератор) с механическим редуктором отбора мощности привода подачи. Нередко при сборке таких элементов в системах станков вследствие несоосности соединений наблюдаются поломки валов датчиков обратной связи или шпилек, соединяющих механические узлы с датчиками. Трудности, связанной с требованием точного расположения электромеханических датчиков, можно избежать путем введения в конструкцию регулировки межцентрового расстояния шестерен, что позволяет производить более точную регулировку зазора и уменьшать трение в зацеплении. Монтаж некоторых подшипников и электромеханических агрегатов производят в подвижных плитах таким образом, чтобы положение валов можно было бы смещать относительно неподвижной части конструкции. После перемещения их и установки наивыгоднейшего зацепления шестерен подвижные плиты могут быть закреплены на месте установочными болтами.

Также в конструкции систем станков важно правильно применять соединительные муфты, которые используются для соединения двух валов вместе для сообщения им вращения с одной скоростью и одинакового углового положения. Имеются несколько типов соединительных муфт, компенсирующих малые смещения валов. Для устранения поломок валов тахогенераторов в станках с ЧПУ была изменена конструкция посадочного места и введена новая гибкая соединительная муфта, позволяющая компенсировать незначительные перекосы при сборке. Конструкция муфты с резиновой шайбой исключила поломки валов из-за возникающих перекосов при установке тахогенераторов в узел обратной связи станка с ЧПУ.

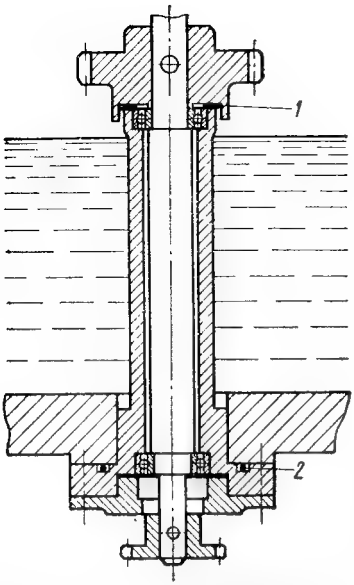


Рис. 113. Промежуточный вал датчика обратной связи

В процессе работы станка с фазовой системой ЧПУ типа ФП-7 и ФП-17 из-за износа уплотнений и не очень удачного конструктивного решения узла датчика обратной связи вертикальной подачи рабочая жидкость гидросистемы попадала через соединение узла датчиков в электромеханические агрегаты системы (вращающиеся трансформаторы и тахогенераторы). Так как эти датчики являются контактными элементами, то попадение масла на коллекторы элементов вызывает отказы системы, причем такие отказы трудно определить. Была разработана новая конструкция узла, изображенная на рис. 113. Доработанный узел позволил вынести соединение датчиков обратной связи за уровень рабочей жидкости и, кроме того, ввод дополнительных уплотнений *1* и *2* исключил попадание масла в датчики. Введение данной доработки в систему станка позволило исключить 100% отказов по этой причине.

При работе на станках с ЧПУ при ошибке оператора или возможной неисправности нередко рабочие органы станка доходят до ограничителей хода движения, которые отключают систему управления станком. В схеме управления станка предусмотрен режим, при котором оператор нажимает кнопку «Сход с упора» и с помощью ручных органов управления рабочие органы станка выводятся в рабочую зону. Если же в системе имеется неисправность, то применение этого режима приводит к поломкам узлов и деталей станка, так как при включении гидросистемы и наличии неисправности в электронных блоках или элементах управления гидросистемой рабочие органы будут двигаться независимо от режима включения. Для исключения возможных ошибок при режиме «Сход с упора» на станке были доработаны ограничители хода — размер их был увеличен. Это исключило выход концевого выклю-

чателя за упор. Включением кнопки «Сход с упора» можно пользоваться до тех пор, пока рабочий орган не будет выведен из опасной зоны.

Электрические шаговые двигатели иногда используются в качестве исполнительного элемента привода лентопротяжного механизма. Питание двигателя при этом осуществляется от сети переменного тока через понижающие трансформаторы. При включении в цепь питания диодов, за счет уменьшения в 2 раза частоты пульсации магнитного потока двигателя, скорость протягивания магнитной ленты в лентопротяжном механизме будет 50 мм/с. Схема управления шаговым двигателем изображена на рис. 114. При работе по такой схеме шаговый двигатель может давать сбои, если управляющий импульс будет переключать обмотки управления в тот момент, когда ротор в процессе свободных колебаний около точки устойчивого равновесия отклоняется больше чем на полшага в сторону, обратную направлению вращения. В этом случае ротор оказывается вне зоны устойчивости по отношению к новому импульсу, смещенному на шаг вперед. При этом ротор переместится в направлении ближайшей точки устойчивого равновесия, т. е. назад, и произойдет опрокидывание или сбой шагового двигателя, что недопустимо в лентопротяжных механизмах. Более надежная схема управления шаговым двигателем приведена на рис. 115. Анализируя осциллограммы процесса управления, можно сказать, что коммутация транзисторов происходит весьма четко через каждую треть периода; форма тока, протекающего через транзистор, близка к прямоугольной; время переходных процессов при коммутации транзисторов на осциллографе не просматривается. Экспериментальные исследования работы шагового привода при такой схеме включения показывают, что шаговый двигатель работает устойчиво и при работе сбои не наблюдаются.

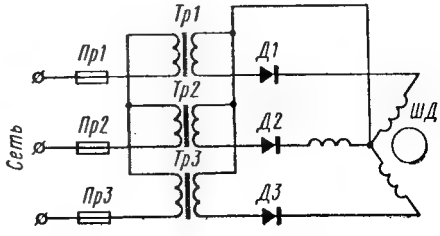


Рис. 114. Схема управления и питания двигателя непосредственно от сети:

Тр1, Тр2, Тр3 — трансформаторы 220/36 В; *Д1, Д2, Д3* — диоды Д226; ШД—шаговый двигатель; *Пр1, Пр2, Пр3* — предохранители

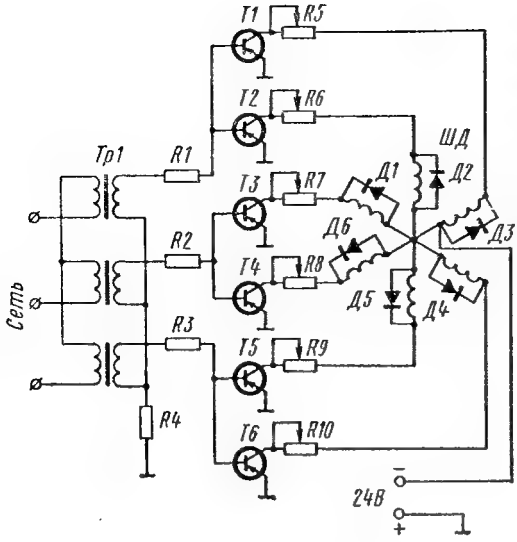


Рис. 115. Схема управления шаговым двигателем от сети и транзисторов:

Т1—Т6 (П4Б) — транзисторы; *Д1—Д6* (Д226) — диоды; *R1—R3* (100 Ом), *R4* (51 Ом), *R5—R10* (20 Ом) — резисторы; *Тр1* — трансформаторы, 3 шт. по 50 Вт, 220/36 В

Обеспечение надежной работы электрических сетей, питающих станки с системами ЧПУ на современном этапе развития и внедрения станков в промышленности, является важнейшей задачей их проектирования и эксплуатации. Станки с ЧПУ можно отнести к электроприемникам первой категории, так как при нарушении электроснабжения их может произойти повреждение дорогостоящего оборудования, массовый брак, расстройство сложного технологического процесса. Электроприемники этой категории должны обеспечиваться питанием от двух независимых источников. Например, при наличии большой группы станков с ЧПУ в механическом цехе электроснабжение этой группы должно производиться по отдельным цеховым сетям, независимым от остального оборудования, и от двух различных подстанций. Питание группы станков с ЧПУ должно осуществляться таким образом, чтобы при выводе в длительный ремонт любого элемента электроснабжающей системы сохранялось питание этих электроприемников.

Для элементов систем ЧПУ приходится применять все меньшие напряжения и токи, которые сравнимы с напряжениями и токами индустриальных помех, создаваемых расположенными по соседству различными электроустройствами и оборудованием. В связи с этим от успеха борьбы

с индустриальными помехами зависит успешное и надежное внедрение систем ЧПУ. К источникам индустриальных помех можно отнести устройства, предназначенные для вырабатывания высокой частоты, используемые для различных целей. Это промышленные и ультразвуковые генераторы, осцилляторы для сварочных аппаратов, электроразрядные установки и т. п. Другой, и более многочисленной, группой источников индустриальных помех являются устройства, в которых помехи появляются в процессе их работы. К ним относятся такие источники, как, например, генераторы постоянного тока, выпрямители и другие преобразователи, электросварочные аппараты, электронные вычислительные машины и малогабаритные настольные счетные электрифицированные машинки и табуляторы, коллекторные электродвигатели, электрифицированный инструмент и т. д. Помехи от устройств этой группы возникают по причине резких изменений рабочего тока или напряжения (переменный ток промышленной частоты или постоянный ток) в электрических цепях устройств и представляют собой токи высокой частоты, содержащие непрерывный спектр колебаний на всех частотах. Величина помех, создаваемых источником на отдельных частотных участках, зависит не только от мощности броска тока, но и от электрических параметров проводов, подключенных к источнику. Распространение помех от источника происходит в виде электромагнитных излучений или по проводам электропитания.

Самым эффективным способом борьбы с помехами является метод подавления их в местах их возникновения, например: разработка конструкций элементов и электрических схем систем ЧПУ без применения разрывных контактов, т. е. применение бесконтактных путевых выключателей и ключевых элементов на тиристорах, замена коллекторных двигателей на асинхронные, контактных датчиков обратной связи на бесконтактные и т. п. Подавление помех на часто срабатывающих контактных устройствах возможно с помощью схемы искрогашения. Схема искрогасителя весьма проста и состоит из последовательно соединенных конденсаторов и сопротивления, включенных параллельно замыкающемуся контакту. В момент размыкания контакта ток в цепи не будет резко изменяться ввиду того, что конденсатор будет заряжаться, тем самым создается как бы обходной путь току и величина помехи уменьшается. Другим способом уменьшения излучения по-

мех может быть рациональное размещение помехообразующих элементов и проводов в системе ЧПУ и на станке с использованием металлических корпусов аппаратуры в качестве экрана и специального экранирования проводов и элементов.

Кроме необходимых связей, определяемых принципиальной схемой, в любой реальной конструкции системы ЧПУ всегда существуют различные паразитные связи, возникающие из-за конечной величины сопротивления соединительных проводов и нежелательных взаимодействий между элементами схемы при их соединении в реальное устройство. При подавлении такого типа помех в системах ЧПУ только комплекс мероприятий, включающих высокое качество проектирования системы, правильный монтаж схемы, правильное расположение оборудования и, в случае необходимости, использование небольшого числа фильтров, сможет обеспечить уменьшение помех до приемлемого уровня и устранит различные типы взаимодействий. Помехи будут снижены до минимума, если в системе выполняются следующие рекомендации.

1. Питание параллельных и потенциально способных взаимодействовать схем осуществляется от достаточно мощной питающей сети (имеется в виду с малым внутренним сопротивлением).

2. В случае питающей сети со сравнительно большим реактивным сопротивлением для питания параллельных схем с тиристорами применяются отдельные трансформаторы. Каждый трансформатор должен быть рассчитан не более чем на номинальную мощность нагрузки данного ответвления.

3. Желательно избегать чисто омических нагрузок, подключаемых с помощью тиристоров к безындуктивной питающей сети, так как они дают наибольшую скорость нарастания тока при отпирании тиристора.

4. Наиболее желателен умеренно индуктивный характер нагрузки, что уменьшает скорость нарастания тока при включении и тем самым приводит к снижению высокочастотных помех и уменьшению возможности взаимодействия между силовыми цепями и цепями управления тиристоров.

5. Оба (или все три) силовых провода цепи питания должны идти вместе; необходимо избегать наличия петель вокруг чувствительных элементов и цепей схем управления.

6. Магнитные элементы необходимо располагать таким образом, чтобы устранить взаимодействие между их полями рассеяния.

7. При экранировании проводов экран должен иметь надежный контакт с заземляющей шиной (корпусом), а точка присоединения должна быть выбрана экспериментально.

§ 6. КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ СТАНКОВ С ЧПУ

Работоспособность определяется как такое состояние системы, при котором она соответствует всем требованиям, установленным в отношении ее основных параметров. Установить состояние, в котором находится система, можно определив состояние ее отдельных элементов, из которых она изготовлена, или экспериментально проверив возможность выполнения системой ее рабочих функций, т. е. контролируя ее основные характеристики [26].

Сложность станков с ЧПУ и систем управления ими вызывает необходимость автоматизации измерения параметров аппаратуры в процессе ее работы. В автоматической аппаратуре контроля работоспособности станков с ЧПУ должны непрерывно контролироваться основные параметры системы и при отклонении одного из них за пределы допуска вырабатываться сигнал о неисправности, а система управления станком должна отключаться с одновременным торможением приводов подач.

Одним из наиболее удобных критериев проверки нормальной работы фазовой системы управления станком является величина рассогласования между управляющим и опорным сигналами. Для исправной системы это рассогласование кратковременно и мало по величине. При наличии в системе станка неисправности появляется большое по величине рассогласование, которое отрабатывается медленно (вяло) или совсем не отрабатывается. Малоактивное действие системы управления станком может быть вызвано рядом причин: установлением неправильного усиления; неправильным соотношением фаз опорного и управляющего сигналов; малым усилением, которое может быть обусловлено дефектами транзисторов или элементов цепей усилителей; излишним механическим трением в силовых передачах и датчиках обратной связи; мертвым ходом (зазорами) в механических цепях и другими

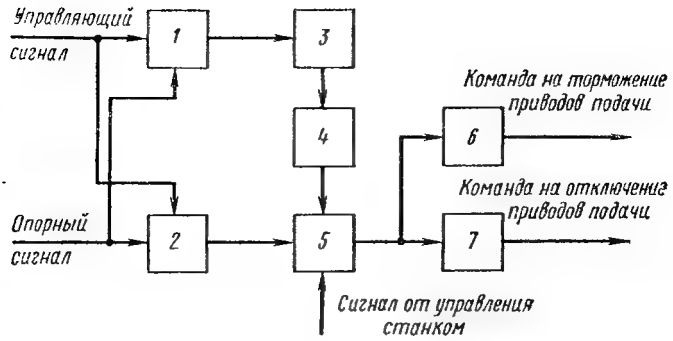


Рис. 116. Функциональная схема автоматического контроля работоспособности системы станка с ЧПУ (одна координата)

неисправностями системы станка. Другим контролируемым параметром для системы управления станком, работающим от программоносителя на магнитной ленте, является величина сигнала, считываемого магнитной головкой.

Проверка исправности незамкнутой (импульсно-шаговой) системы управления станком с ЧПУ более проста, чем замкнутой системы, и в данной работе рассмотрена не будет [13, 26].

На рис. 116 приведена функциональная схема автоматического контроля работоспособности системы следящего привода подач, применяющаяся в станках с ЧПУ типа ФП-7, ФП-17, ФП-9, и ПФП-5, оснащенных пультами управления типа ПФСТ-12-500. Система контроля обеспечивает мгновенное отключение управления станком с последующим торможением приводов подач при нарушении нормальной работы системы управления. Система автоматического контроля встроена в пульт управления станком. В схеме контроля можно выделить две основные части: контролирующую, в которую входит устройство контроля уровня сигналов *2* и устройство сравнения управляющего и опорного сигналов (схема совпадения *1*), и вспомогательную, состоящую из схемы торможения *6*, бункера *3*, схемы расширения импульсов *4*, исполнительного реле *5* и реле времени *7*.

Схема контроля уровня сигналов, независимо от режима работы станка (по программе или при ручном управлении,) постоянно следит из уровнем управляющего и опорного

сигналов. При нормальном уровне обоих сигналов, равном 3 мВ или более, сигнал, поступающий со схемы контроля уровня сигналов, равен нулю. Если по какой-либо причине (например, неисправен внутренний генератор 250 Гц, низкий уровень сигнала записи на магнитной ленте, склейка магнитной ленты, плохая работа узла протягивания магнитной ленты, неисправность в усилителях считывания) уровень одного или обоих сигналов упадет ниже 3 мВ, то на выходе схемы появится сигнал, потенциал которого действует на исполнительное реле, выдающее команду на отключение системы управления и на торможение приводов подач станка.

Устройство сравнения (схема совпадения), как и схема контроля уровня, постоянно и независимо от режима работы станка следит за фазовым углом сдвига между управляющим и опорным сигналами. Сигнал на схему контроля за его уровнем снимается после усилителей считывания для управляющего сигнала, а для опорного сигнала — после усилителя вращающегося трансформатора с электронного блока системы управления станком. Сигналы на схему совпадения отбираются после формирователей как по опорному, так и по управляющему каналам. При нормальном режиме работы следящего привода подачи, в моменты установившейся скорости или в моменты отсутствия движения, фазовый сдвиг между опорным и управляющим сигналами стремится к 180°. При разгоне или торможении исполнительного узла фазовый сдвиг опорного сигнала относительно управляющего вследствие запаздывания привода подачи изменяется соответственно в сторону отставания или опережения на некоторую величину. При этом если величина разгона или торможения не превышает паспортных данных исправного станка, то фазовый сдвиг между сигналами будет оставаться в пределах 20—340°. Это значит, что на входы схемы совпадения опорный и управляющий сигналы не могут поступить одновременно, а следовательно, на выходе этой схемы сигнал будет отсутствовать. Фазовый сдвиг определяется направлением движения рабочего органа; при движении в одну сторону фазовый сдвиг уменьшается от 180° и может быть равен 20°, так как в этих пределах обеспечивается устойчивая работа следящего привода системы, выбор в 20° определен с некоторым запасом; если угол будет дальше уменьшаться, то при таком рассогласовании может наблюдаться неустойчивая работа

следящей системы. Аналогично и при движении в другую сторону, т. е. в сторону увеличения угла рассогласования, 340° тоже выбран с учетом запаса по устойчивой работе следящего привода.

В случае нарушения нормальной работы привода подач, что неизбежно приводит к увеличению запаздывания в отработке управляющего сигнала, или в том случае, когда управляющий сигнал содержит слишком большое ускорение, превышающее паспортные данные, взаимное смещение фаз опорного и управляющего сигналов будет изменяться в пределах 0—360°, что свидетельствует о выходе системы управления из режима слежения. При достижении сдвига фаз между управляющим и опорным сигналами 0° или 360°, оба сигнала начинают приходить на схему совпадения одновременно и на выходе последней появляются импульсы с частотой повторения, равной частоте сигналов управления. Выход схемы совпадения соединен со входом бункера, который работает на переполнение. Его емкость составляет два импульса, третий является переполняющим и одновременно сигналом неисправности системы управления станка.

Для защиты устройства сравнения от случайных одиночных импульсов, которые возникают в результате помех, в устройстве предусмотрен возврат бункера в исходное состояние. Если бункер не будет переполнен в течение определенного промежутка времени после прихода первого импульса, то он автоматически возвращается в исходное состояние, не выдав на свой выход никакого сигнала. При наличии неисправности в системе станка сигнал с выхода бункера, пройдя схему расширения импульсов, запустит исполнительное реле, которое, как и в случае работы устройства контроля уровня сигналов, выдаст команду на отключение и торможение приводов подач станка.

Схема бункера представляет собой сочетание нескольких схем (рис. 117). На транзисторах *Т1* и *Т2* собран одновибратор, управляющий работой ключей (транзисторы *Т3* и *Т6*). На транзисторах *Т4* и *Т5* собран обычный триггер со счетным входом. Диоды *Д2*, *Д3*, *Д5* образуют логическую схему ИЛИ.

В исходном состоянии бункера транзистор *Т1* открыт поданным на его базу отрицательным смещением через сопротивление *R1*. Падение напряжения на сопротивлении *R3*, образующееся за счет прохождения тока через откры-

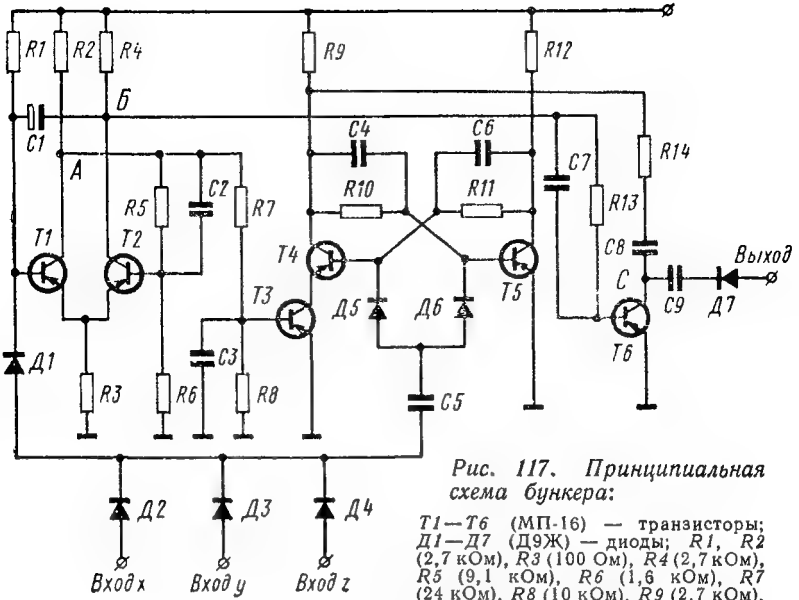


Рис. 117. Принципиальная схема бункера:

T1—T6 (МП-16) — транзисторы; *Д1—Д7* (Д9Ж) — диоды; *R1*, *R2* (2,7 кОм), *R3* (100 Ом), *R4* (2,7 кОм), *R5* (9,1 кОм), *R6* (1,6 кОм), *R7* (24 кОм), *R8* (10 кОм), *R9* (2,7 кОм), *R10*, *R11* (10 кОм), *R12* (2,7 кОм), *R13* (10 кОм), *R14* —резисторы; *C1* (15 мкФ), *C2 C3* (200 мкФ), *C4* (3300 мкФ), *C5* (1600 мкФ), *C6* (3300 мкФ), *C7* (200 мкФ), *C8* (820 мкФ), *C9* (0,01 мкФ)

тый транзистор *T1* в положительной полярности через сопротивление *R6*, приложено к базе транзистора *T2*, вследствие чего последний находится в закрытом состоянии. Следовательно, потенциал коллектора *T1* (точка *А*) имеет минимальную, а потенциал коллектора *T2* (точка *Б*) максимальную величину отрицательного напряжения. Ввиду отсутствия напряжения на делителе *R7*, *R8* транзистор *T3* находится в закрытом состоянии, тем самым он как бы открывает эмиттер транзистора *T4* от плюса питания. В результате триггер на транзисторах *T4*, *T5* находится в состоянии «сброса». В то же время максимальное отрицательное напряжение в точке *Б* через сопротивление *R13* приложено к базе транзистора *T5*. Последний находится в открытом состоянии, шунтируя точку *С* на «землю».

Появляющиеся на любом из входов схемы ИЛИ импульсы положительной полярности проходят одновременно на вход одновибратора (*T1*, *T2*) и на счетный вход триггера (*T4*, *T5*). С приходом первого импульса триггер продолжает оставаться в состоянии «сброса», а транзи-

стор *Т1* этим импульсом запирается. Это приводит к опрокидыванию одновибратора и он находится в неустойчивом состоянии. Время нахождения одновибратора в неустойчивом состоянии в основном определяется величинами *R1* и *С1*. В результате опрокидывания одновибратора, в точках *А* и *Б* установятся напряжения, противоположные первоначальному исходному состоянию, т. е. точка *А* будет иметь максимальную, а точка *Б* минимальную величину отрицательного напряжения. Появившееся отрицательное напряжение в точке *А* через делитель *R7*, *R8* прикладывается к базе транзистора *Т3*, что приводит к его полному открытию. Тем самым триггер (*Т4*, *Т5*) не изменяет своего первоначального состояния (*Т4* закрыт, *Т5* — открыт), т. е. он подготовлен к счету. Одновременно с этим, уменьшившийся отрицательный потенциал в точке *Б* закрывает транзистор *Т6*, и последний расшунтирует точку *С*.

Если за время опрокинутого состояния одновибратора на входы бункера успеет поступить еще не менее двух импульсов, то дальнейшая работа будет происходить следующим образом.

Второй импульс состояния транзистора *Т1* не изменит, он лишь подтверждает его закрытое состояние. Действуя же на счетный вход триггера *Т4*, *Т5*, он закроет транзистор *Т5*, что приводит к опрокидыванию триггера в другое устойчивое состояние. В момент опрокидывания триггера (в момент открытия транзистора *Т4*)· положительный перепад (потенциал) напряжения на коллекторе *Т4* в виде импульса через цепочку, состоящую из *R14—С8—С9*, задерживается диодом *Д7*, который включен для прохождения на выход только отрицательных импульсов. Следовательно, после второго импульса на выходе бункера сигнал будет отсутствовать. И только третий входной импульс, снова подтвердив состояние транзистора *Т1*, заставит закрыться транзистор триггера, в данном случае транзистор *Т4*. Триггер при этом опрокидывается в первоначальное состояние. Повышение отрицательного напряжения на коллекторе *Т4* в момент его закрытия в виде импульса через цепочку, состоящую из *R14—С8—С9*, и диод *Д7* поступает на выход бункера.

Если за время опрокинутого состояния одновибратора (*Т1*, *Т2*) на вход схемы бункера успеет поступить только один импульс (т. е. второй по счету), то возвратившийся в исходное состояние одновибратор также возвратит

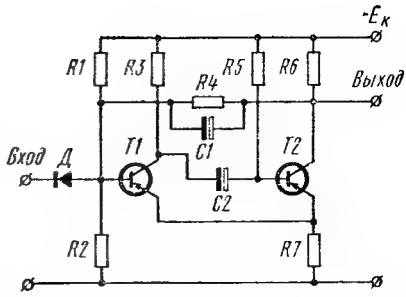


Рис. 118. Принципиальная схема расширения импульса:

T1, T2 (МП-14) — транзисторы; *Д* — диод -Д9Ж; *R1* (9,1 кОм), *R2* (2,4 кОм), *R3* (2,7 кОм), *R4* (9,1 кОм), *R5* (43 кОм), *R6* (2,7 кОм), *R7* (100 кОм) — резисторы; *C1* (680 мкФ), *C2* (30 мкФ)— конденсаторы

в исходное состояние триггер. При этом на коллекторе транзистора *T4*, как и в последнем случае, возникает отрицательный перепад напряжения в виде импульса, поступающий на цепочку *R14—C8—C9—Д7*. Для того чтобы не допустить прохода этого импульса на выход бункера, необходимо несколько разнести во времени момент «сброса» триггера от момента открытия транзистора *T6*, т. е. сначала открыть транзистор *T6*, зашунтировав точку *C* на «землю», затем «сбросить» триггер. Это условие обеспечивается подключением «форсирующей» емкости *C7* параллельно сопротивлению *R13* и «замедляющей» емкости *C3* параллельно сопротивлению *P8*. Таким образом, на выходе бункера появится импульс только в том случае, если на его вход поступит не менее трех импульсов в течение определенного времени (0,3—0,5 с).

Короткий выходной импульс с бункера не предоставляется возможным использовать в качестве сигнала включающего исполнительное реле. Кроме того, исполнительное реле должно оставаться во включенном состоянии такое время, пока приводы подач станка будут отключены и заторможены, а импульс с бункера очень короткий, так как в качестве бункера используется триггер.

Для увеличения длительности импульса применена схема расширения импульса (рис. 118). В качестве схемы, расширяющей выходной импульс бункера до длительности примерно в 2 с, применен одновибратор. Запуск одновибратора осуществляется отрицательными импульсами, получаемыми с выхода бункера.

В исходном положении в ждущем режиме транзистор *T1* находится в насыщенном состоянии, а транзистор *T2* — в закрытом состоянии, так как база *T1* подключена к источнику через делитель *R1* и *R2*. В этом состоянии одновибратор находится до тех пор, пока на него не подается запускающий импульс.

Отрицательный импульс запуска через диод *Д* передается на базу открытого транзистора *Т1* и запирает его. По мере уменьшения коллекторного тока *Т1* потенциал эмиттера уменьшается и достигает такой величины, при которой открывается транзистор *Т2*. Появившийся коллекторный ток транзистора *Т2* еще больше повышает потенциал коллектора *Т2* и, следовательно, базы транзистора *Т1*. Происходит опрокидывание, в результате которого транзистор *Т1* закрывается, а транзистор *Т2* открывается, и начинается рабочая стадия, во время которой происходит перезаряд конденсатора *С2* от источника напряжения через резистор *R3*, транзистор *Т2* и резистор *R7*. Рабочая стадия заканчивается, когда потенциал базы транзистора *Т2* достигает величины, при которой транзистор начинает закрываться. Происходит обратное опрокидывание: транзистор *Т1* отпирается, а транзистор *Т2* закрывается. В результате на коллекторе *Т2* образуется положительный импульс длительностью $t \approx 0{,}7R_5C_2$. Расширение импульса по времени необходимо для обеспечения времени отключения и торможения приводов подач станка при срабатывании системы контроля.

Схема контроля уровня сигналов, приведенная на рис. 119, состоит из двух идентичных усилителей постоянного тока, работающих в режиме, близком к ключевому. Схема работает следующим образом: при считывании программы с магнитной ленты управляющий сигнал, который подается с усилителя считывания электронной системы управления станка, непрерывно поступает на «Вход I» схемы контроля уровня. Опорный сигнал, отбираемый от усилителя вращающегося трансформатора, непрерывно поступает на «Вход II». Сигналы с входов, выпрямленные диодами, поступают на базы транзисторов *Т1* и *Т2* и открывают их. Когда транзисторы *Т1* и *Т2*

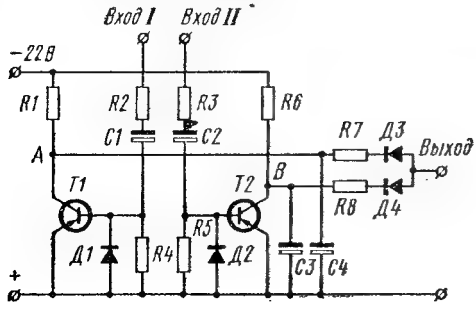


Рис. 119. Принципиальная схема блока контроля уровня сигнала:

Т1, Т2—транзисторы МП-16; *Д1 — Д4* — диоды Д9Ж; *R1* (15 кОм), *R2*, *R3* (2 кОм, подбираются), *R4*, *R5* (2,4 кОм), *R6* (15 кОм), *R7*, *R8* (24 кОм) — резисторы; *С1*, *С2* (5 мкФ), *С3*, *С4* (10 мкФ) — конденсаторы

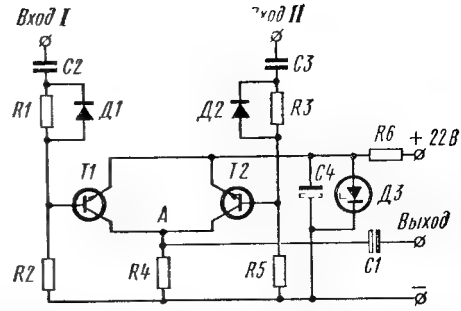


Рис. 120. Принципиальная схема блока совпадения:

T1, *T2* — транзисторы МП-11; *Д1*, *Д2* (Д9Ж), *Д3* (Д813) — диоды; *R1* (15 кОм), *R2* (39 кОм), *R3* (15 кОм), *R4* (1,5 кОм), *R5* (39 кОм), *R6* (360 Ом) — резисторы; *C1* (0,05 мкФ), *C2*, *C3* (2000 пФ), *C4* (15 мкФ) — конденсаторы

открыты, точки *A* и *B* коллекторных цепей будут соединены с положительной шиной источника питания. При таком состоянии схемы потенциал на выходе схемы будет почти равен нулю. При достижении амплитуды синусоидального сигнала, поступающего на входы схемы контроля уровня ее нижнего предела, схема выдаст сигнал на исполнительное реле. Например, если величина сигнала, поступающего на «Вход I», будет меньше 3 Мв, то выпрямленный сигнал на базе транзистора *T1* уже не в состоянии будет удержать его в открытом состоянии и транзистор скачком закроется, при этом произойдет повышение потенциала на коллекторе транзистора. Повышение потенциала используется для воздействия на исполнительное реле. Цепочка, состоящая из резистора *R7* и емкости *C4*, служит для формирования сигнала, действующего на исполнительное реле. Аналогично работает схема и при изменении величины опорного сигнала, поступающего на «Вход II». Настройка на уровень входного сигнала, при котором закрываются транзисторы *T1* и *T2*, производится подбором сопротивлений резисторов *R2* и *R3*.

Схема совпадения, показанная на рис. 120, собрана на транзисторах *n—p—n* перехода. На ее «Входы I и II» поступают прямоугольные сигналы с выходов формирователей опорного и управляющего каналов электронной схемы системы управления станком. Конденсаторы *C2* и *C3* совместно с сопротивлениями *R2* и *R5* представляют собой цепочки, с помощью которых дифференцируются оба сигнала. Диоды *Д1* и *Д2* позволяют дифференцировать только отрицательные фронты входных прямоугольных сигналов. Сопротивления *R1* и *R3* способствуют некоторому расширению длительности продифференцированных импульсов. В исходном состоянии оба транзистора *T1* и *T2* открыты, так как на их базы через сопротивления *R2*

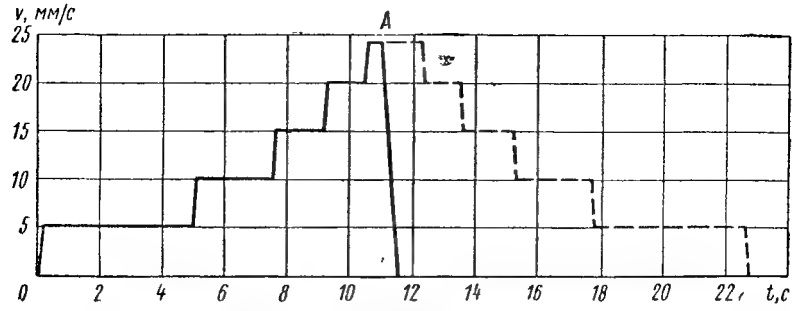


Рис. 121. График (по осциллограмме) поведения системы станка с ЧПУ при наличии неисправности (обрыв цепи обратной связи)

и *R*5 подается положительное напряжение смещения. Потенциал точки *А* близок по величине к напряжению источника питания, так как падение напряжения на открытом транзисторе мало. С приходом продифференцированного отрицательного импульса на базу одного из транзисторов последний закроется на время действия импульса. Поскольку на базу второго транзистора в данный момент времени импульс не поступил, он продолжает оставаться в открытом состоянии. Таким образом, потенциал точки *А* во время действия входного импульса на первом транзисторе не изменится и на выходе схемы совпадения сигнал будет отсутствовать. При одновременном приходе импульсов на базы транзисторов *Т1* и *Т2* они закроются, и потенциал точки *А*, на время действия импульсов, понизится до величины, близкой к нулю. Этот положительный перепад напряжения и является выходным сигналом схемы. Через емкость *С1* он поступает в схему бункера и далее на исполнительное реле, действующее на отключение и торможение системы станка. Стабилитрон *Д3*, емкость *С4* и сопротивление *R6* обеспечивают стабилизацию и фильтрацию цепей питания схемы.

Для определения реакции системы станка при работе с устройством контроля в станок вводилась специальная тест-программа со скачкообразным изменением скорости движения по всем координатам.

На рис. 121 приведен график поведения системы станка при наличии в ней неисправности (точка *А* на графике). При появлении неисправности система контроля отключила систему управления станка и произвела торможение привода рабочего органа.

Глава VII

Техническая подготовленность персонала, обслуживающего станки с системами ЧПУ

§ 1. ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ НАЛАДЧИКОВ НА ПОИСК И УСТРАНЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Рост производительности труда в промышленности в значительной степени зависит от организации работ по обслуживанию основного производства, особенно при использовании станков и оборудования с системами ЧПУ.

Перед ремонтными службами промышленных предприятий стоят следующие основные задачи: 1) постоянно содержать оборудование в технически исправном и рабочем состоянии; 2) сокращать простои оборудования в ремонте и повышать коэффициент его эффективного использования; 3) повышать производительность труда и снижать трудоемкость ремонта.

Организация службы ремонта оборудования на промышленном предприятии при применении станков с ЧПУ очень сложна. Поэтому техническая подготовленность персонала становится все более актуальной и состоит из:

1) численности и профессионального состава инженерно-технического персонала ремонтных служб; 2) численности и профессионального состава рабочих; 3) требований, предъявляемых к квалификации инженерно-технических работников и рабочих ремонтной службы предприятия.

Численность работников, занятых обслуживанием и ремонтом оборудования, неуклонно растет. На численность этих работников на каждом заводе оказывают влияние такие факторы, как тип производства, сложность оборудования, степень его автоматизации и механизации, коэффициент экстенсивной (количественной) и интенсивной (напряженной) нагрузки оборудования, уровень орга-

низации труда и производства в ремонтных службах, качество ремонта и межремонтного обслуживания и т. п. По данным, приведенным в работе В. Я. Якобас [52], доля ремонтных рабочих в общей численности рабочих колеблется в пределах 3,5—13,2% (в службе главного механика 1 8—8,7% и в службе главного энергетика 1,7—4,5%).

Рост сложности технических систем и, в частности станков с системами ЧПУ, вызывает необходимость привлечения к обслуживанию этих систем специалистов высокой квалификации, имеющих подготовку по средствам вычислительной техники, автоматизированным следящим системам управления, электро- и гидроприводам и другим системам.

Значительное влияние на надежность аппаратуры станков с ЧПУ в процессе ее эксплуатации оказывают факторы субъективного характера, связанные с деятельностью обслуживающего персонала. По некоторым данным, до 30% отказов аппаратуры происходит по вине лиц, эксплуатирующих эту аппаратуру. К числу наиболее существенных субъективных эксплуатационных факторов можно отнести: 1) квалификацию обслуживающего персонала; 2) организацию системы технического контроля; 3) организацию системы технического обслуживания.

Влияние квалификации обслуживающего персонала сказывается главным образом на качестве подготовки аппаратуры ЧПУ к работе и на процессе восстановления ее работоспособности после отказа. Персонал, хорошо знающий аппаратуру ЧПУ и обладающий необходимым минимумом практических навыков, всегда меньше совершает ошибок, связанных с неправильной и неточной настройкой, регулировкой, значительно меньше тратит времени на поиск неисправностей и т. п. Если обслуживающий персонал специализирован по отдельным подсистемам станков с ЧПУ, то он быстро обнаруживает и устраняет неисправности и отказы, возникающие в процессе работы аппаратуры системы ЧПУ или при ее профилактической проверке. Решающее значение в подготовке обслуживающего персонала имеет то, что он должен твердо знать работу всех подсистем станка с ЧПУ, их взаимосвязь, функциональные и принципиальные схемы станков и систем ЧПУ, а также происходящие в них физические процессы. Он также должен обладать общей методикой поиска неисправностей в системах и владеть

инструментальными (приборными) методами отыскания отказавших узлов, блоков и элементов в этих системах.

Влияние недостаточной квалификации обслуживающего персонала может уменьшаться, если применять автоматизированный контроль работоспособности систем ЧПУ, контроль параметров узлов и блоков, а также автоматизацию процесса поиска неисправностей и отказов в аппаратуре.

Квалификация работников обслуживания во многом влияет на эффективность эксплуатационных мероприятий. Однако это влияние не равномерно, при сравнительно простых операциях влияние высокой квалификации сказывается сравнительно мало. Квалификация работника имеет большое значение при выполнении сложных наладочных и проверочных операций, связанных с принятием субъективных решений. Например, при ремонте однотипного электронного оборудования с одинаковой надежностью техники заменяют в среднем больше элементов, узлов и блоков, чем инженеры. Вместе с тем статистика показывает, что элементы, узлы и блоки с механическими повреждениями выявляются техниками и инженерами в одинаковом количестве. Решение о замене элемента, узла или блока из-за постепенного ухудшения его электрических характеристик обычно бывает субъективным. Здесь труд инженера оказывается более эффективным: инженеры меняют значительно меньше элементов, узлов и блоков, чем техники. Следует, однако, отметить, что как инженеры, так и техники меняют при ремонте больше элементов, узлов и блоков, чем это необходимо для восстановления аппаратуры ЧПУ.

От методов подбора и подготовки как рабочих ремонтников, так и механиков, энергетиков и других инженерно-технических работников ремонтной службы станков с системами ЧПУ зависит не только производительность их труда, но и эффективность основного производства. В ремонтных службах по станкам с системами ЧПУ должны быть специалисты узкого профиля (по электроприводу, гидроприводу, вычислительным машинам, механики по точным машинам) и высококвалифицированные универсалы (специалисты по электронным системам, по автоматизированным системам, электромеханики по точным системам).

На одном заводе была проведена статистическая оценка работы специалистов, занятых обслуживанием и ремонтом станков с систе-

мами ЧПУ. Из группы специалистов с различной профессиональной подготовкой, различным стажем работы по данной специальности, различными деловыми качествами были выбраны шесть работников, за которыми велось наблюдение в процессе их работы. Для оценки технической подготовленности и влияния ее на производительность труда сравнивалось время восстановления отказавших узлов и блоков систем ЧПУ. Для более точного выявления этой величины определялось среднестатистическое время восстановления узла или блока после отказа.

Если ввести количественные критерии для оценки деятельности исполнителей, то можно определить необходимую квалификацию и остальные требования, предъявляемые к персоналу, обслуживающему станки с системами ЧПУ. Количественная оценка деятельности работника может характеризоваться по трем критериям: опыт работы, деловые качества и образование. Сравнение производительности труда исполнителя на основе статистических данных и критериев оценки деятельности дает возможность оценить влияние технической подготовленности обслуживающего персонала на поиск и устранение неисправности в системах ЧПУ, а также определить необходимую квалификацию и опыт работы для качественного обслуживания. В табл. 12 приведены статистические дан-

Таблица 12

Значения среднестатистического времени поиска неисправности отдельных исполнителей

Содержание работы	Время, затрачиваемое на поиск и устранение неисправности различными исполнителями, в ч					
	1	2	3	4	5	6
Поиск и устранение неисправности в электронном блоке системы ЧПУ	4,4	4,2	3,4	2,5	6,2	3,7
Поиск и устранение неисправности в лентопротяжном механизме	4,6	5,2	2,6	3,0	5,2	2,7

ные по поиску и устранению неисправностей узлов и блоков систем ЧПУ при выполнении этих работ разными исполнителями. Сравнение данных статистической и объективной полезности показало, что наименьшее количество времени на поиск и устранение неисправности в узлах

и блоках системы ЧПУ затратил исполнитель, имеющий высшее образование, больший стаж работы и хорошие деловые качества, на этом же примерно уровне может быть оценена работа исполнителя со средним техническим специальным образованием, с большим стажем работы и очень хорошими деловыми качествами. Такой метод подбора и оценки работ специалистов ремонтной службы позволяет достаточно достоверно оценивать производительность их труда и поддерживать интенсивность этого труда на достаточно высоком уровне.

§ 2. ПРИБОРНОЕ ОСНАЩЕНИЕ НАЛАДЧИКОВ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ ЧПУ

Кроме повышения квалификации обслуживающего персонала, существуют два метода сокращения времени на поиск неисправностей в узлах, блоках и системах ЧПУ: 1) проектирование и использование специальной контрольной аппаратуры поиска неисправностей (см. гл. IV и VI); 2) внедрение методов оптимального обнаружения и отыскания неисправных узлов, блоков и элементов. Для решения второй задачи необходимо систематизировать способы поиска неисправных элементов, узлов и блоков и разработать оптимальные пути контроля систем ЧПУ.

В процессе отыскания неисправностей элементы, узлы, блоки могут находиться в трех состояниях: исправном (работоспособном), неисправном (неработоспособном) и непроверенном. Поиск неисправности заключается в опознании элементов, которые не отвечают требуемым параметрам и не реагируют на заданное воздействие. В начале поиска все элементы, узлы и блоки находятся в непроверенном состоянии. Для того чтобы определить, какая из возможных неисправностей имеет место, необходимо провести ряд проверок. Проведение проверок в системах ЧПУ может осуществляться двумя методами: комбинационным или последовательным.

Комбинационный метод заключается в том, что после проверки исправности нескольких элементов начинается поузловая или блочная проверка функционирования узлов и блоков системы ЧПУ, или после проверки отдельных элементов проверяется вся система. Комбинационный поиск неисправных элементов целесообразен в том случае, если можно предположить, что неисправна значительная часть элементов (блоков, узлов) системы. Обычно комби-

национный метод поиска неисправностей применяется при капитальных ремонтах станков с системами ЧПУ. Например, поступающий на капитальный ремонт станок с ЧПУ разбирается, и все элементы, узлы и блоки проверяются на работоспособность, выявляются неисправные, заменяются резервными или восстанавливаются до работоспособного состояния, затем все элементы, узлы и блоки собираются в системе станка и снова проверяется весь станок.

Последовательный метод заключается в том, что поиск неисправных элементов осуществляется в определенном порядке после проведения очередной проверки, в зависимости от результатов этой проверки назначается последующая проверка. Благодаря этому методу удается сократить общее число проверок и, следовательно, время обнаружения неисправности. Такой метод в основном применяется, когда предполагается, что неисправен один элемент (узел, блок), и сводится к использованию контрольных проверок, каждая из которых позволяет всю имеющуюся совокупность элементов (узлов, блоков) системы поделить на две части (в одной имеется неисправность, а в другой нет неисправного элемента, узла, блока). Применение определенной последовательности проверок приводит к точному определению одного единственного неисправного элемента (узла, блока) при наименьших затратах времени. Рациональный выбор последовательности очередных проверок зависит от природных способностей (интуиции) наладчика, опыта эксплуатации, знаний взаимных связей между элементами, узлами и блоками системы ЧПУ, но могут быть предложены и два логических способа выбора последовательности проверок.

При первом способе наладчик не знает критериев надежности элементов (узлов, блоков) системы ЧПУ, т. е. он не знает средней наработки на отказ и среднего времени восстановления, или вероятности безотказной работы. Предполагается, что любой узел, блок или элемент системы ЧПУ с равной вероятностью может быть причиной отказа станка и системы, а затраты времени на осуществление контроля системы после отказа одинаковы. В данном случае наладчик всю совокупность элементов (узлов, блоков) делит на две подгруппы. На основе этого метода при каждой проверке проверяется только одна из подгрупп, и если в этой подгруппе не обнаружена неисправность, то вторая подгруппа снова делится на две

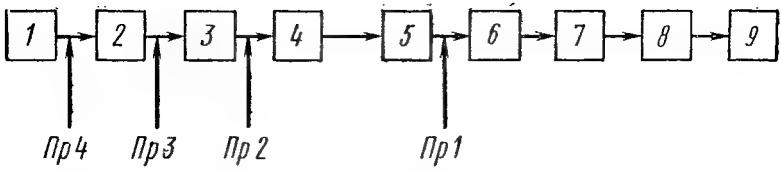


Рис. 122. Метод средней точки при поиске неисправности:

Пр1, Пр2, Пр3, Пр4 — очередные проверки; *1* — магнитная лента; *2* — воспроизводящий узел; *3* — электронный блок; *4* — шаговый двигатель; *5* — источник питания; *6* — гидростанция; *7* — управляющий золотник; *8* — гидроусилитель; *9* — механические узлы

и то же проверяется только одна из подгрупп и т. д. до определения неисправного элемента (узла, блока). При делении совокупности элементов на две подгруппы желательно, чтобы каждая из подгрупп содержала одинаковое число элементов (узлов, блоков). Часто такой способ проверки и поиска неисправностей называют методом средней точки. Сущность этого способа поясняется на рис. 122, где изображена структурная схема системы ЧПУ станка 6Н13-ГЭ2 (одна координата), у которой поток информации (возмущения) начинается на первом элементе и заканчивается на выходе последнего элемента.

Первая проверка *Пр1* в этой системе осуществляется в точке между элементами *5* и *6*. При этом система делится на две подгруппы, состоящие из элементов с *1* по *5* и с *6* по *9*, и проверяется исправность с *6* по *9* элемент. Если элементы с *6* по *9* исправны, значит элементы с *1* по *5* неисправны. Элементы с *1* по *5* снова делятся на две подгруппы и осуществляется вторая проверка *Пр2* в точке между элементами *3* и *4* и т. д. до определения неисправного элемента (узла, блока). Если в результате первой проверки *Пр1* обнаружено, что один из элементов с *6* по *9* отказал, то последующая проверка осуществляется в точке между элементами *7* и *8* и т. д. Метод средней точки является для указанных выше условий оптимальным в том смысле, что при его применении сводится к минимуму наибольшее число проверок, необходимых для выявления любой неисправности.

Второй способ поиска неисправностей основан на опыте эксплуатации станков и систем ЧПУ. При поиске неисправностей, основанном на опыте эксплуатации систем ЧПУ, можно с помощью информационных схем выявить оптимальную структуру схемы поиска. Для оптимального

поиска неисправного элемента (узла, блока) предлагают следующие правила.

1. Для каждого элемента (узла, блока) системы вычисляется вероятность безотказной работы по данным об отказах, полученных в результате реальной эксплуатации. При этом предполагается, что отказал только один элемент (узел, блок).

2. Обозначения элементов (узлов, блоков) располагают вертикально в порядке уменьшения вероятности безотказной работы.

3. Два последних элемента (узла, блока) с наименьшей вероятностью безотказной работы группируются в новый элемент, вероятность безотказной работы которого складывается из вероятностей этих двух группировок элементов.

4. Полученный после этого элемент группируется со следующим элементом, который имеет наименьшую вероятность. Определяется новая вероятность путем сложения вероятностей.

5. Процесс повторяется до тех пор, пока все элементы (узлы, блоки) не будут сгруппированы в один условный элемент.

В качестве примера рассмотрим построение информационной схемы по данным эксплуатации фазовой системы ЧПУ станка типа ФП-7. Система условно разбита на пять элементов; электронные блоки с вероятностью безотказной работы P_1; пускорегулирующая аппаратура с вероятностью P_2; лентопротяжный механизм с вероятностью P_3; гидравлическая система, вероятность которой P_4; механические узлы с вероятностью P_5. Располагая вероятности безотказной работы элементов в порядке убывания, получим P_4; P_2; P_5; P_1; P_3 и строим схему поиска; она показана на рис. 123 и имеет при этом оптимальную структуру. Информационная схема поиска получается из структурной путем формального перестроения. Из схемы видно (рис. 123), что первая проверка *Пр1* должна разделить всю совокупность элементов на две: P_4 и P_2 с одной стороны и P_5; P_1 и P_3 с другой стороны. Если исправны P_4 и P_2 элементы, то необходимо провести поиск неисправности в элементах P_5 и P_1; P_3 и т. д. [13].

На время отыскания неисправностей в системах и станках с ЧПУ большое влияние оказывают не только квалификация обслуживающего персонала, оптимальные схемы

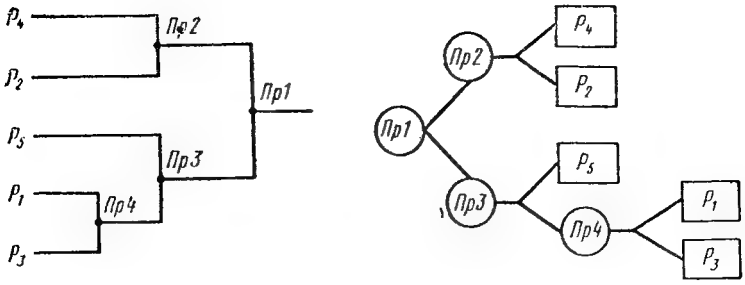


Рис. 123. Информационная схема поиска неисправности в системе ЧПУ:
P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 — вероятности безотказной работы; *Пр1*, *Пр2*, *Пр3*, *Пр4* — проверки системы

поиска неисправностей, но и приборная (инструментальная) оснащенность наладчиков.

Для сокращения времени поиска и устранения неисправностей в станках и системах ЧПУ обслуживающий персонал должен быть обеспечен контрольно-измерительной аппаратурой, позволяющей измерить и контролировать все параметры системы ЧПУ, а также с помощью этой аппаратуры и специальных стендов проводить наладку, регулировку и ремонт узлов и блоков систем ЧПУ. Подбор электроизмерительной аппаратуры и устройств должен определяться типами станков и системами ЧПУ. Списки измерительной аппаратуры можно найти в различных справочных материалах.

Типы некоторых приборов, рекомендуемых наладочным и ремонтным участкам (службам) станков с системами ЧПУ, приведены в табл. 13—22.

Таблица 13

Мегомметры для проверки состояния изоляции электрических цепей систем ЧПУ

Тип	Напряжение в В	Пределы измерений
М1101	500; 100	От 1000 кОм до 200 МОм
М1102	500	» 1000 кОм » 200 МОм
М4122	2500	0,5—10 000 МОм

Таблица 14

Мосты постоянного тока одинарные для измерения сопротивлений (средних и больших величин)

Тип	Пределы измерений в Ом	Погрешность в %
Р353, малогабаритный	0,2—5 000	±1—5
ММВ, малый мост	0,05—5 000	±2—3
Р316, универсальный мост . . .	0,00001—1 000 000	0,5—2

Таблица 15

Одинарно-двойные мосты постоянного тока для измерения малоомных сопротивлений

Тип	Пределы измерений в Ом	Погрешность в %
МОД61	0,00001—100	0,05—2
МТВ	0,000001—1 000 000	0,2—3

Таблица 16

Мосты переменного тока для измерения индуктивности, емкости и диэлектрических потерь

Тип	Напряжение	Емкости		Индуктивности		Сопротивления	
		предел измерения	Погрешность в %	предел измерения	Погрешность в %	предел измерения	Погрешность в %
Р577, переносной универсальный	220; 127 В	От 1 пФ до 1100 мкФ	±1	От 1 мкГн до 110 Гн	±1	От 0,1 Ом до 11 МОм	1,5
МД-16 * переносной	5—10 кВ	От 30 пФ до 0,4 мкФ	±0,5	—	—	—	—
Е8-2 (для измерения емкостей)	220 В	0,0001 пФ—11,1 мкФ	±0,25	—	—	—	—

* По углу диэлектрических потерь (tg δ) 0,05—6%.

Таблица 17

Омметры

Тип	Пределы измерений	Примечание
М57	От 20 до 1500 Ом	Карманный; питание от батарей КБС
М371	От 100 Ом до 10 МОм	Погрешность 1,5%
М218	0,1 до 100 Ом; до 100 кОм; до 10 МОм	Многопредельный; класс 1,5—2,5; питание от сети или сухих элементов

Таблица 18

Фазоуказатели для определения чередования фаз сети

Тип	Частоты в Гц	Напряжение в В
И517	40—50	50—500
Э-500, универсальный *	50	110—380

* Для определения cos φ.

Таблица 19

Частотомеры для измерения частот генераторов и сигналов переменного тока (напряжение сети 220 и 127 В, 50 Гц)

Тип	Диапазон частот	Напряжение входа в В
Ч3-1	10—200 000 Гц Погрешность ±2%	0,5—200
Ч3-4А	0—100 МГц	0,9

Таблица 20

Эммитерные осциллографы

Тип	Полоса частот в МГц	Чувствительность в мм/МВ
С1-19, однолучевой на низкие частоты	До 1	5
С1-4, однолучевой с послесвечением на низкие частоты	—	—
С1-18, двухлучевой с послесвечением	До 1	10—0,5
С1-49, малогабаритные	» 5	10 мВ/дец
С1-16, двухлучевой	» 5	0,5

Таблица 21

Светолучевые (шлейфные) осциллографы для записи процессов

Тип	Число каналов	Запись	Скорость протягивания ленты (бумаги) в мм/с	Тип гальванометра	Питание от сети
Н102	8	На фотоленту 35 мм	1—500	Н135; МОВ2 и Д1	220 В; 50 Гц
К12-21	12	На фотобумагу 100 мм	3—250	1—V11 *	Постоянный ток 27 В
К12-22 **	12	На фотобумагу 120 мм; длина 40 м	0,8—1000	1—V11	То же

* Амплитудная погрешность гальванометров ±3—5%.
** Погрешность при регистрации величины силы тока ±1—1,5%.

Кроме того, необходимы следующие приборы для ремонтных и наладочных участков.

1. Вектормер для измерения тока и напряжения по величине и фазе, а также для определения угла сдвига фазы в цепях переменного тока; частота 40—50 Гц, напряжение 0,15—300 В, ток 0,01—5,0 *А*, угол $\alpha = 0 \div 360°$.

2. Приборы для измерения чисел оборотов и линейных перемещений:

а) стробоскоп типа СТ-4 для измерения чисел оборотов в пределах 100—30 000 в минуту (с неоновой лампой для подсвечивания);

б) многопредельный механический тахометр типа СК751 для измерения чисел оборотов в пределах 0—10 000 в минуту и окружных скоростей в пределах 0—1000 м/мин, погрешность ±2%;

в) секундомер (хронометр) типа «Агат», предел измерений до 30 мин, цена деления 0,2 с;

г) моментный секундомер (хронометр), предел измерений до 60 с, цена деления 0,01 с.

3. Приборы для снятия характеристик с электроприводов станков;

а) указатель полярности обмоток типа М227; чувствительность 18 мВ, питание от батарей КБС;

Таблица 22

Электронные вольтметры для измерения напряжения в электронных цепях систем ЧПУ

Тип	Пределы измерений в В	Питание от сети	Характеристика
ВК7-9	Постоянный ток 0,1—500 1—1000 (от 20 Гц до 700 МГц)		На полупроводниках
В3-13	0,5 мВ — 300 В (от 20 Гц до 1 МГц)	220 В; 50 Гц	Ламповый; погрешность ±4—6%
В2-3	От 1 до 1000 мВ	220 В; 50 Гц	Милливольтметр постоянного тока; погрешность ±4%
В4-2	0—150 В	220 В; 50 Гц	Ламповый, импульсный; измерение прямоугольных импульсов 0—150 В амплитудного значения напряжения; входное сопротивление 200 кОм (4 МГц), входная емкость не более 14 пФ; погрешность ±4%
В3-21	10 мВ — 300 В (до 1 МГц)	220 В; 50 Гц	Ламповый; погрешность 2,5—6%
В3-7	0,3—300	220 В; 50 Гц	Повышенной точности Погрешность ±2,5—4%
В5-1	5 мВ — 15 В (от 20 Гц до 20 кГц)	—	Фазочувствительный; точность определения фазового угла ±5%

б) индикатор искрения типа ИИ-1 для оценки коммутации щеток;

в) милливеберметр типа М119 для измерения магнитных потоков с помощью индуктивных катушек;

г) приборы для проверки состояния обмоток электрических машин (типа ЕА1 или др.), служат для обнаружения замыкания в обмотках электрических машин и для выявления мест с ослабленной изоляцией.

4. Электроизмерительные клещи типа Ц91 для измерения переменных токов в сетях до 600 В при токе 2—500 А, 50 Гц.

5. Для измерения токов и напряжений в электрических цепях необходимы различные стрелочные приборы: амперметры, вольтметры, микроамперметры, миллиамперметры класса 1,0; можно использовать и многопредельные приборы типа авоомметров, вольтамперметров, тестеров и самописцев.

6. Приборы для измерения параметров транзисторов и радиоламп:

а) измеритель параметров радиоламп типа Л1-3 для проверки основных параметров радиоламп, а также для снятия статических характеристик;

б) испытатель параметров плоскостных кристаллических триодов типа ИПТ-1 для измерения коэффициента усиления по току, выходной проводимости, начального тока коллектора;

в) измеритель параметров для измерения основных параметров маломощных транзисторов типа *p—n—p* и *n—p—n* и диодов малой и средней мощности; питание от батарей;

г) измеритель параметров мощных транзисторов типа Л2-13.

7. Для измерения сигналов при проверке станков с системами ЧПУ необходимы следующие измерительные усилители;

а) типа У2-1А, диапазон частот 200—10 000 Гц; измерение напряжения в пределах 10—200 000 мкВ; точность измерения ±5—10%;

б) широкополосный типа У3-3; полоса частот от 5 кГц до 150 МГц; коэффициент усиления 25 дБ; питание от сети 220 В.

8. Генераторы:

а) сдвинутых импульсов типа Г5-7А; частота повторения импульсов от 2 Гц до 20 кГц; длительность импульсов

в пределах 0,4—2000 мкс; амплитуда импульсов не менее 50 В;

б) звуковой частоты типа Г3-2; диапазон генерируемых частот 20—20 000 Гц; погрешность ±2%; максимальное напряжение выхода 150 В (выход рассчитан на нагрузку с сопротивлением в 50, 200, 600 или 5000 Ом); питание от сети 220, 127, 110 В, 50 Гц;

в) стандартных сигналов типа Г4-1А; диапазон частот от 100 кГц до 25 МГц, основная погрешность по частоте ±1%, напряжение выхода 0,1—100 000 мкВ, питание от сети 220, 127 В, 50 Гц.

9. При наладке и проверке гидростанций, насосов, гидродвигателей и других узлов и элементов гидросистем для измерения параметров необходимы манометры, датчики давления, индикаторы линейных перемещений и др.

Все перечисленные измерительные приборы необходимы для наладки, регулировки, ремонта и поиска неисправностей в станках с системами ЧПУ. В процессе эксплуатации контрольно-измерительную аппаратуру следует выбирать в зависимости от вида и характера измерений и от того, какую точность результатов измерений при этом необходимо получить.

Во всех наладочных и испытательных работах при работе на станках с системами ЧПУ с измерительными приборами необходимо руководствоваться «Правилами техники безопасности при производстве электромонтажных работ», а также ведомственными правилами и инструкциями, учитывающими особенности станков с системами ЧПУ и исполнителей работ. В связи с повышенной опасностью к наладочным и испытательным работам на станки с ЧПУ может допускаться только специально обученный персонал, обладающий не только необходимыми знаниями, но и высокой производственной дисциплиной [32, 44]. Поскольку наладчикам приходится работать при испытании и наладке с включенными системами, которые находятся под напряжением, для обеспечения безопасности необходимо применять специальные меры. В связи с разнообразием и сложностью испытательных и наладочных работ нельзя дать единых рекомендаций о методах и средствах защиты. Поэтому при работе с измерительными приборами, питаемыми от сети или имеющими рабочее напряжение более 60 В, главными мерами защиты является надежная защита самого наладчика. Необходимо пользоваться изоляционными помостами (ре-

шетками) или резиновыми коврами. Обувь, одежда и руки наладчика должны быть сухими, инструмент, применяемый им, должен иметь изолированные рукоятки. Вся измерительная аппаратура должна находиться на изолированных подставках (столы, гетинакс, электрокартон и др.). Выводные концы приборов должны иметь достаточно надежную изоляцию и исключать случайное касание к неизолированным местам выводов. Приборы должны быть надежно заземлены. Здесь рассмотрены только отдельные вопросы по технике безопасности при работе с приборами.

§ 3. ОРГАНИЗАЦИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАНКОВ С СИСТЕМАМИ ЧПУ

На промышленных предприятиях существуют три основные вида организации ремонтных служб: централизованная, децентрализованная и смешанная [12]. Централизованная организация ремонтной службы предусматривает выполнение всех ремонтных работ и межремонтного обслуживания силами и средствами специализированной и высококвалифицированной службы предприятия.

Децентрализованная организация ремонтной службы состоит в том, что все виды ремонтных работ и межремонтное обслуживание, профилактические работы (в том числе и капитальные ремонты) производятся под руководством механиков (энергетиков) цехов и силами цеховых ремонтных служб.

Смешанная организация ремонтной службы характеризуется тем, что все ремонтные работы, кроме капитальных ремонтов, выполняются силами цеховых ремонтных служб. Капитальный ремонт (иногда и средний ремонт станков и электродвигателей) и изготовление запасных частей для однотипного оборудования выполняют ремонтные цехи (ремонтно-механический и электроцех) предприятия.

На промышленных предприятиях наибольшее распространение получили децентрализованный и смешанный виды организации ремонтных служб. Эти виды организации ремонтных служб имеют ряд недостатков: ремонт обходится, как правило, очень дорого; качество ремонта низкое; велика продолжительность ремонта; из-за отсутствия квалифицированных кадров качество межремонтного обслуживания низкое, а отсюда и велики простои

оборудования. Особенно большие трудности при проведении ремонтных работ малого количества установленных станков с системами ЧПУ испытывают цеховые ремонтные службы, так как состав их малоквалифицированный и незначительный. В такой ремонтной службе невозможно оборудовать достаточно качественную ремонтную базу и трудно создать постоянные высококвалифицированные кадры ремонтного персонала. Затраты на ремонт станков с ЧПУ при децентрализованной и смешанной системах ремонта большие, так как в такой системе нельзя механизировать и автоматизировать ремонт.

На стоимость ремонта и обслуживания станков с ЧПУ влияют такие факторы, как применяемые системы оплаты труда и формы материального стимулирования. Рекомендации по нормированию ремонтных работ, технической оснащенности цеховых ремонтных служб, технологии ремонта станков и систем ЧПУ еще не разработаны, и поэтому каждое предприятие и цеховая служба пользуются своими техническими нормами, которые не отвечают современным требованиям по проведению ремонтных работ.

По мере внедрения в производство систем и станков с ЧПУ и конструктивного усложнения этого оборудования потребность в ремонтных кадрах более узкой специальности (гидравликов, электроников, механиков, электриков) вызвала необходимость применения в ряде случаев централизованного ремонта.

Наиболее важной проблемой организации централизованной ремонтной службы с точки зрения основного производства следует считать быстроту ремонта, т. е. необходимость немедленно выполнить те или иные ремонтные работы при отказе в системе или в станке с ЧПУ. На некоторых предприятиях стоимость потерь от простоя станков с ЧПУ колеблется, в зависимости от типа станка, от 1,25 до 5 р./ч. Отказы в работе оборудования возникают внезапно, и ремонт производить необходимо немедленно, так как простои станков с ЧПУ обходятся предприятию очень дорого. Это несколько осложняет деятельность централизованной службы, но если ремонтные бригады находятся вблизи участка станков с ЧПУ и время, необходимое для того, чтобы ремонтные бригады начали аварийный ремонт, незначительное (10—15 мин), то и эта проблема при централизованном ремонте решается успешно. Централизация ремонтной службы и межре-

монтного обслуживания станков с ЧПУ повышает оперативность руководства ремонтными бригадами, создает необходимые предпосылки широкой специализации службы по категориям специалистов и по видам систем ЧПУ и моделям станков.

Другая сфера деятельности централизованной службы предприятия связана с установкой, наладкой и вводом в эксплуатацию новых станков с ЧПУ. Инженеры централизованной службы следят за точным соблюдением инструкций по монтажу станков и систем ЧПУ, руководят наладчиками и участвуют сами в пуске, наладке и проверке параметров систем ЧПУ. Наиболее эффективно могут быть организованы доработки конструкции станков, замена элементов схем на их аналоги с повышенной надежностью, а также проведение модернизаций, испытаний и проверки станков с ЧПУ при централизованной форме обслуживания, так как в этом случае вся техническая политика, документация по доработкам и модернизации будет единой и производство этих работ будет осуществляться под единым руководством и по общей методике. Даже такой вопрос, как размножение электронных и электрических схем, которые в процессе работы изнашиваются и постоянно требуют замены, так как в них должны быть отражены все доработки, при централизованной форме организации ремонтной службы успешно решается.

Для определения оптимального запаса сменных узлов, блоков и элементов в системах ЧПУ необходимо иметь точные данные о надежности этих элементов, а без централизованного учета и сбора статистических данных невозможно правильное планирование запаса узлов, блоков и элементов, так как срок службы последних зависит не только от качества их изготовления, но и от условий эксплуатации. При централизованной ремонтной службе можно с минимальными затратами и наиболее эффективно использовать материалы; запасные части и контрольно-измерительную аппаратуру. Кроме того, при наличии единого руководства можно осуществлять повышение надежности систем ЧПУ применением наиболее надежных установочных элементов и материалов.

Большим резервом дальнейшего роста производительности при производстве ремонтных работ является совершенствование организационных форм и методов по межремонтному профилактическому и дежурному обслуживанию. Статистика показывает, что доля этих работ

составляет примерно 50% общего объема работ, выполняемых ремонтными службами на промышленных предприятиях [52]. Организация централизованного межремонтного профилактического и дежурного обслуживания является важным средством обеспечения высокой надежности станков с ЧПУ. На снижение общих затрат и повышение эффективности ремонта и межремонтного обслуживания значительное влияние оказывает повышение ответственности работников службы за качество ремонта и бесперебойную работу станков с ЧПУ. Опыт показывает, что если за ремонтными бригадами или отдельными работниками закреплены определенные группа или участок станков, то это повышает ответственность ремонтных бригад, и, как правило, количество отказов и время простоя на закрепленных станках и оборудовании значительно меньше, чем на не закрепленных.

При централизованной системе обслуживания станков и систем ЧПУ необходимо предусматривать совмещение профилактических работ слесарей, электриков, специалистов по электронике и гидравлике. Работники службы обслуживания должны не только хорошо знать станки с системами ЧПУ и условия их эксплуатации, но и быть заинтересованы в результатах своего труда.

Повышение уровня управления ремонтными службами на промышленных предприятиях — это непрерывный процесс совершенствования функции, форм и методов управления на основе новейших достижений науки, техники и передового опыта в целях наивысших результатов при наименьших затратах.

Рассмотрим организацию централизованной службы (бюро) обслуживания систем ЧПУ на машиностроительном заводе, входящей в состав заводской лаборатории электропривода и промышленной электроники. В функции службы обслуживания станков с ЧПУ входит:

1. Проведение профилактических и ремонтных работ по электронному и электрическому оборудованию станков с ЧПУ.

2. Разработка и изготовление новых схемных решений, направленных на повышение надежности систем ЧПУ.

3. Разработка и изготовление специальной контрольной аппаратуры и стендов для проверки и наладки отдельных узлов и блоков систем ЧПУ.

4. Контроль за монтажом станков с ЧПУ, отладка и ввод их в эксплуатацию.

5. Составление годового плана планово-предупредительного ремонта по системам ЧПУ.

6. Составление заявок на запасные и комплектующие элементы.

7. Контроль за соблюдением правил эксплуатации и техники безопасности при работе на станках с ЧПУ в производственных цехах.

8. Участие во внедрении обработки деталей на станках с ЧПУ.

9. Ответственность совместно с другими службами за бесперебойную работу станков с ЧПУ.

10. Составление графиков проверки качества работы станков с ЧПУ.

11. Подготовка технической документации на доработки и модернизацию систем ЧПУ.

Обслуживающий персонал службы закреплен за определенными производственными цехами, где установлены станки с ЧПУ, и там, где их много, и там, где их два-три. Кроме того, работники службы специализированы по отдельным типам систем ЧПУ (рис. 124).

При определении количества инженеров и обслуживающего персонала в централизованной ремонтной службе станков с ЧПУ следует придерживаться рекомендаций единой системы планово-предупредительных ремонтов, а также рекомендаций общепромышленных нормативов.

Организация специализированной ремонтной службы на предприятии в состоянии обеспечить регулярный ремонт и обслуживание особо важного или часто выходящего из строя станка и системы ЧПУ. Часть работ, включая и аварийные, выполняются совместно силами всех ремонтных служб предприятия.

Централизованная ремонтная служба может полностью обеспечить техническое обслуживание электронной аппаратуры и электрооборудования станков с ЧПУ. Для этого она располагает всем необходимым: хорошо оснащена контрольной аппаратурой, приборами и специальными наладочными и проверочными стендами. Работники ремонтной службы знают о последних разработках в системах ЧПУ, новых материалах и элементах, применяемых в аппаратуре станков с ЧПУ, и поэтому могут использовать их при ремонте или модернизации. Наличие квалифицированной рабочей силы и инженеров гарантирует высокое качество обслуживания и сокращение времени простоя дорогостоящего оборудования.

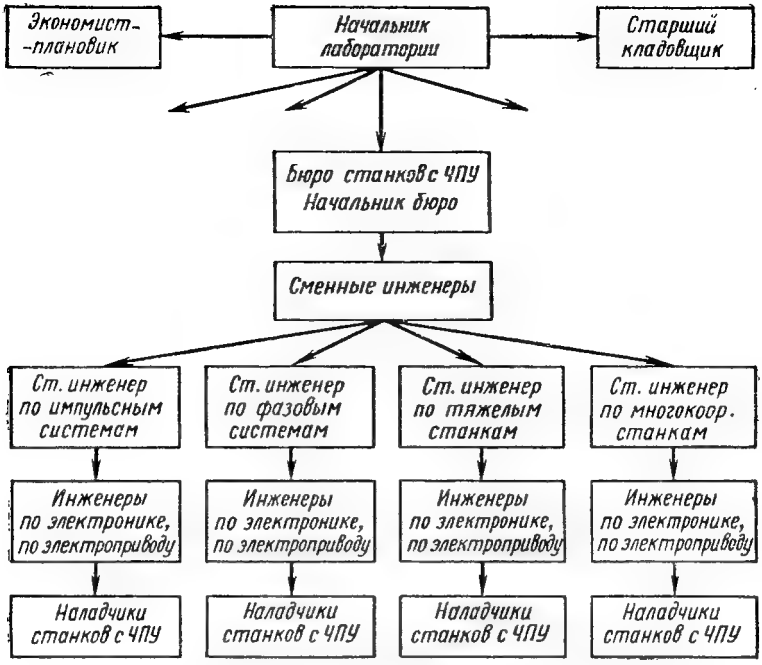


Рис. 124. Структура централизованной службы обслуживания станков с системами ЧПУ

В машиностроении поддержание технологического оборудования в работоспособном состоянии осуществляется по единой системе рациональной эксплуатации и планово-предупредительного ремонта (ППР). Система ППР имеет профилактическую направленность. Ее сущность заключается в том, что периодически, после отработки каждым станком определенного числа часов, производятся профилактические осмотры и различные виды плановых ремонтов (малый или текущий, средний, капитальный), чередование и периодичность которых зависит от назначения станка, его конструктивных и ремонтных особенностей, в том числе точностных характеристик, ремонтопригодности, а также и от условий эксплуатации, определяемых свойствами обрабатываемых материалов и типом производства.

Осуществление мероприятий по программе планово-предупредительного ремонта станков с ЧПУ дает следующие преимущества.

1. Увеличение выпуска продукции в результате сокращения времени простоя оборудования.

2. Уменьшение количества сверхурочных работ, так как ремонт производится по графику, а не по аварийным вызовам.

3. Более эффективное использование рабочей силы ремонтной службы.

4. Уменьшение количества крупных ремонтов, поскольку ремонт производится до аварии (обычно выход из строя одной детали или элемента влечет за собой выход из строя других).

5. Сокращение запасов сменных и ремонтных узлов и блоков, а также количества резервного оборудования.

При составлении графика ППР должна быть учтена специфика входящих в современный станок с ЧПУ отдельных устройств: 1) электрогидравлического или электрического следящего привода; 2) силовых винтовых пар (винт—гайка и направляющих качения); 3) лентопротяжного механизма для магнитной или перфорированной ленты, считывающего устройства; 4) управляющей вычислительной специальной машины или электронной и электрической частей схем управления станком.

На рис. 125 приведен график ППР электронной и электрических частей станка с ЧПУ модели ФП-17М, составленный на год.

Практика показала, что при двухсменной работе для обеспечения безотказного функционирования гидросистем станков с ЧПУ, оснащенных гидроприводом, они нуждаются в промывке фильтров и трубопроводов и замене масла через каждые три месяца. В связи с этим график ППР предусматривает эти работы; под индексом ПРГ введена промывка гидросистемы станка, кроме того ме-

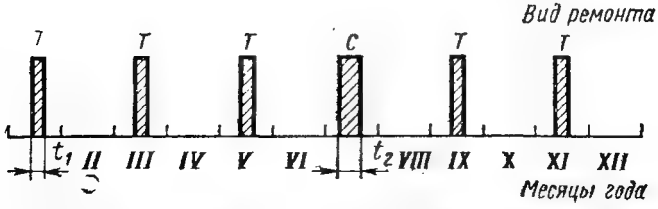


Рис. 125. Периодичность планово-предупредительного ремонта для электронной и электрической частей станка с ЧПУ типа ФП-17М

Т — текущий ремонт; *С* — средний ремонт; t_1 и t_2 — продолжительность проведения ремонта (профилактики)

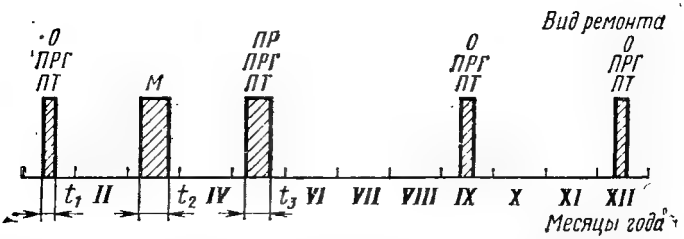


Рис. 126. Периодичность планово-предупредительного ремонта механической и гидравлической частей станка с ЧПУ типа 6Н13-ГЭ2.

М — малый (текущий) ремонт; *ПРГ* — промывка гидравлической системы; *ПТ* — проверка точности; *ПР* — промывка станка; *О* — осмотр; τ_1, τ_2 и τ_3 — продолжительность проведения ремонта, промывки, осмотра и проверки точности

сяца, в котором производится ремонт, включающий такую промывку как обязательную. Графиком ППР предусматривается ежеквартальная проверка точности станка с ЧПУ (индекс ПТ) так же, как финишных станков, точность которых непосредственно влияет на линейные размеры готовой детали. В связи с этим проверке подлежат те точностные параметры станка, которые ухудшаются при износе деталей станка; люфты пар качения, зазоры в сочленениях элементов кинематических передач и в лимбах, биение шпинделя (влияющего на ширину паза, фрезеруемого калиброванным инструментом) и пр. Систематическое наблюдение за износом позволяет произвести своевременный ремонт и предупредить брак обрабатываемых деталей. График проверок совместно с ремонтом механической и гидравлической части станка с ЧПУ модели 6Н13-ГЭ2 приведен на рис. 126.

При составлении графиков ППР необходим тесный контакт механиков, гидравликов, электроников и электриков, хорошо знающих состояние установленных в цехах станков с ЧПУ. При определении технически обоснованных нормированных заданий ремонта станков и систем ЧПУ за основу берутся нормативы единой системы ППР, которые корректируются на предприятиях с учетом хронометражных наблюдений и существующего уровня организации ремонтных работ.

Можно рекомендовать следующие методы нормирования ремонтных работ по нормам времени [50, 52]:

1) нормирование с применением динамических рядов удельных показателей ремонта;

2) нормирование с применением статистических методов;

3) нормирование в процессе непосредственного производства работ (метод моментных наблюдений);

4) расчетно-аналитическое нормирование.

Опыт промышленных предприятий, внедривших технически обоснованные нормы на ремонт станков и систем ЧПУ, показывает, что такое нормирование дает повышение производительности труда ремонтных рабочих примерно на 15—20%.

На основе статистических данных для станков типа ФП-16Н нормы времени на текущий (малый) ремонт электронной и электрической частей и лентопротяжного механизма составляет 50 ч и средний ремонт — 249 ч.

Содержание текущего (малого) ремонта сводится к осмотру всех элементов, узлов и блоков электронной и электрической части системы, удалению из указанных узлов и блоков пыли, стружки и других посторонних предметов с помощью пылесоса или щетки. Производят проверку и регулировку лентопротяжного механизма, промывку и смазку подшипников двигателей механизма и направляющих роликов, а также замену тормозных лент двигателей перемотки и подмотки и шлифование магнитной головки и резины прижимного ролика. Проверяют индикаторами биение тон-вала ведущего двигателя, направляющих и прижимного ролика. В электрической части системы проверяют состояние изоляции, выполняют регулировку и чистку контактов пускорегулирующей аппаратуры, которую в случае наличия неисправностей заменяют на исправную. В электронной части системы управления проверяют все параметры и режимы, форму и величину всех сигналов и напряжений в контрольных точках системы: результаты измерений заносят в специальную таблицу. После проведения всех работ проверяют правильность действия всех элементов станка по тест-программе.

При среднем ремонте проводят все мероприятия текущего ремонта и производят частичную или полную разборку отдельных элементов или блоков, а также замену неисправных и износившихся частей и элементов. Проверяют действие всей системы станка. Более полно вопросы ремонта и его планирования рассмотрены в литературе [14, 29, 53].

Список литературы

1. **Базовский И.** Надежность, теория и практика. М., «Мир», 1965, 373 с.
2. **Барун В. А., Будинский А. А.** Станки с программным управлением и программирование обработки. М.—Л., «Машиностроение», 1965, 348 с.
3. **Башта Т. М., Зайченко И. З., Ермаков В. В.** Объемные гидравлические приводы. М., «Машиностроение», 1969, 627 с.
4. **Брандт А. А., Ржевкин К. С.** Техника монтажа и налаживания радиосхем. Изд-во МГУ, 1966, 445 с.
5. **Васильев Д. В., Чуич В. Г.** Системы автоматического управления. М., «Высшая школа», 1967, 419 с.
6. **Вешеневский С. Н.** Характеристики двигателей в электроприводе. М.—Л., «Энергия», 1966, 400 с.
7. **Вопросы** магнитной записи электрических сигналов. Под ред. проф. И. Е. Горона. М., «Связь», 1970, 231 с.
8. **Ворошилов М. С.** Проектирование и расчет следящих систем с программным управлением. М.—Л., «Машиностроение», 1969, 264 с.
9. **Гавриленко В. А., Минин В. А., Рождественский С. И.** Гидравлический привод. М., «Машиностроение», 1968, 502 с.
10. **Гамынин А. С., Каменир Я. А., Коробочкин Б. Л.** Гидравлический следящий привод. М., «Машиностроение», 1968, 562 с.
11. **Гемке Р. Г.** Неисправности электрических машин. Л., «Энергия», 1969, 272 с.
12. **Гельберг Б. Т., Пекелис Г. Д.** Ремонт промышленного оборудования. М., «Высшая школа», 1971, 384 с.
13. **Дружинин Г. В.** Надежность систем автоматизации. М., «Энергия» 1967, 528 с.
14. **Единая** система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий, М., «Машиностроение», 1967, 582 с.
15. **Емельянов А. И., Емельянов В. А., Калинин С. А.** Практические расчеты в автоматике. М., «Машиностроение», 1967, 316 с.
16. **Каган Б. М., Адасько В. И., Пурэ Р. Р.** Запоминающие устройства большой емкости. М., «Энергия», 1968, 320 с.
17. **Калабро С. Р.** Принципы и практические вопросы надежности. М., «Машиностроение», 1966, 375 с.
18. **Карандеев К. Б., Карпюк Б. В., Касперович А. Н.** Под общей редакцией К. Б. Карандеева. Электрические методы автоматического контроля. М.—Л., «Энергия», 1965, 383 с.

19. **Киселев В. М.** Фазовые системы числового программного управления станками. М., «Машиностроение», 1966, 374 с.
20. **Козлов Б. А., Ушаков И. А.** Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Советское радио», 1966, 432 с.
21. **Комаров А. А.** Надежность гидравлических систем. М., «Машиностроение», 1969, 235 с.
22. **Левичев В. Г.** Транзисторные усилители. М., Военное издательство Министерства Обороны СССР, 1967, 208 с.
23. **Магнитная** запись электрических сигналов. Перевод иностранной периодической печати, перевод А. И. Вичеса, М., «Энергия», 1967, 280 с.
24. **Меламед Г., Счасливенко Ф.** Надежность и долговечность станочных систем. Минск, «Беларусь», 1967, 222 с.
25. **Металлорежущие** станки. Под ред. Н. С. Ачеркана. Т. 1, 2, М., «Машиностроение», 1965, 764 с. и 628 с.
26. **Мозгалевский А. В., Гаскаров Д. В., Глазунов Л. П.** Автоматический поиск неисправностей. Л., «Машиностроение», 1967, 262 с.
27. **Николаевский И. Ф., Игумнов Д. В.** Параметры и предельные режимы работы транзисторов. М., «Советское радио», 1971, 381 с.
28. **Новопольский В. А.** Современный осциллограф М.—Л., «Энергия», 1969, 208 с.
29. **Петенко В. А., Зотов И. И., Королев И. В.** Организация ремонтной службы на заводе. М., «Экономика», 1965, 45 с.
30. **Петров Г. Н.** Электрические машины. М.—Л., «Энергия», 1968, 224 с.
31. **Пономаренко Ю. Ф.** Испытание гидропередач. М., «Машиностроение», 1969, 292 с.
32. **Потапов А. М.** Настройка и испытание следящих приводов. Л., «Энергия», 1970, 101 с.
33. **Ратмиров В. А., Чурин И. Н., Шмутер С. Л.** Повышение точности и производительности станков с программным управлением. М., «Машиностроение», 1970, 343 с.
34. **Расчет** схем на транзисторах. Перевод с англ. К. Г. Меркулова, В. М. Придорогина, Э. И. Рувеновой. М., «Энергия», 1969, 584 с.
35. **Рупф К., Пульверс М.** Справочник по транзисторным схемам. М., «Мир», 1965, 242 с.
36. **Ситник Н. Х.** Силовая полупроводниковая техника. М., «Энергия», 1968, 320 с.
37. **Соловьев В. Я.** Осциллографические измерения. М., «Энергия», 1968, 54 с.
38. **Солодухо Я. Ю., Белявский Р. З., Плеханов С. Н.** Тиристорный электропривод постоянного тока. М., 1971, 104 с.
39. **Спиридонов А. А., Федоров В. Б.** Металлорежущие станки с программным управлением. М., «Машиностроение», 1972, 352 с.
40. **Справочник** по радиоэлектронике. Под ред. А. А. Куликовского. Т. 1, 1967, 640 с. Т. 2, 1968, 536 с. Т3, 1970, 816 с.
41. **Справочник** по импульсной технике. Под ред В. Н. Яковлева. Киев, «Техника», 1970, 656 с.
42. **Теория** и техника магнитной записи. Перевод с нем., англ. и японского. Под ред. В. Г. Королькова. М., «Мир», 1968, 291 с.
43. **Тиристоры** (технический справочник). Перевод с англ. Под ред. В. А. Лабунцова и др. М., «Энергия», 1971, 560 с.
44. **Тун А. Я.** Наладка электрических машин электроприводов, М., «Энергия», 1970, 192 с.

45. **Хертель В., Дегенхарт И., Кюблер А.** Светолучевые осциллографы. Перевод с нем. Под ред. П. С. Богуславского. М.—Л., «Энергия», 1965, 456 с.
46. **Хохлов В. А., Прокофьев В. Н., Борисова Н. Н.** Электрогидравлические следящие системы. М., «Машиностроение», 1971,431 с.
47. **Цикин Г. С.** Усилительные устройства. М., «Связь», 1971, 366 с.
48. **Чех И.** Осциллографы в измерительной технике. Перевод с нем. Под ред. В. А. Новопольского. М., «Энергия», 1965, 784 с.
49. **Шишенок Н. А., Репкин В. Ф., Барвинский Л. Л.** Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., «Советское радио», 1964, 550 с.
50. **Экономика** и организация ремонта оборудования в США, Перевод с англ. Под ред. М. Д. Шухгальтера. М.—Л., «Прогресс», 1969, 324 с.
51. **Элементы** ЭВМ на полупроводниковых приборах. Под ред. Е. И. Гальперина. М., «Советское радио», 1969, 560 с.
52. **Якобас В. А.** НОТ в ремонтных службах предприятия. М., «Экономика», 1971, 158 с.
53. **Якобсон М. О.** Планово-предупредительный ремонт в машиностроении. М., «Машиностроение», 1969, 150 с.

Оглавление

Предисловие 3
Глава I. **Типовые системы числового программного управления** 5
§ 1. Классификация и принцип действия станков с системами ЧПУ 5
§ 2. Типовые схемы систем ЧПУ 11
§ 3. Требования, предъявляемые к станкам и системам ЧПУ 24
Глава II. **Основные погрешности и характерные неисправности элементов станков с ЧПУ и систем их управления** 29
§ 1. Магнитная лента . . . 29
§ 2. Воспроизводящие узлы 37
§ 3. Лентопротяжные механизмы 45
§ 4. Усилители 50
§ 5. Корректирующие цепи 57
§ 6. Управляющие элементы 61
§ 7. Влияние свойств жидкости на работу гидросистемы станка с ЧПУ 70
§ 8. Приводы станков с ЧПУ 73
§ 9. Датчики положения 91
§ 10. Влияние зазоров и трения в силовых передачах, датчиках обратной связи, механических и гидравлических узлах 96
Глава III. **Влияние регулировок и настроек на устойчивость и надежность работы станка с системой ЧПУ** . . . 100
§ 1. Влияние изменений, происходящих в магнитном носителе 100
§ 2. Регулировка и настройка магнитной головки . . . 104
§ 3. Влияние изменения коэффициента усиления системы и отдельных блоков 109
§ 4. Настройка управляющих элементов 114
§ 5. Настройка элементов и узлов гидросистемы станков 119
§ 6. Установка и регулировка датчиков станков с ЧПУ 125
§ 7. Настройка частотно-зависимых цепей и их влияние на работу ЧПУ 128
§ 8. Влияние зазоров в силовых передачах и датчиках на качество работы станка с ЧПУ 134
Глава IV. **Комплексные испытания станков с системами ЧПУ** 140
§ 1. Проверка системы станка с ЧПУ тест-программами 140
§ 2. Измерение параметров системы с помощью стандартных и специальных приборов 148
§ 3. Состояние системы управления станка при воздействии на нее внешними сигналами 158
§ 4. Специальное оборудование для испытания и наладки узлов и блоков вне станка 165
§ 5. Определение характера поведения системы станка при наличии неисправностей . . 183
Глава V. **Определение характеристик надежности станочных систем ЧПУ по данным об их отказах** 190
§ 1. Сбор и обработка информации о работе станков с ЧПУ 190
§ 2. Определение критериев надежности 195
§ 3. Определение наиболее вероятных значений наработки на отказ 200
§ 4. Определение наиболее вероятных значений среднего времени восстановления после отказа 205
§ 5. Определение среднего числа неработающих узлов, блоков и элементов станков с ЧПУ 209
§ 6. Определение среднего времени между профилактическими обслуживаниями оборудования 214
§ 7. Определение количества запасных частей для станков с ЧПУ 218
§ 8. Определение среднего времени обслуживания станка с ЧПУ и отдельных его блоков и узлов 221
§ 9. Определение интенсивности отказов 223
Глава VI. **Совершенствование конструкций и повышение надежности станков с системами ЧПУ** 226
§ 1. Методы повышения надежности станков с ЧПУ . . 226
§ 2. Конструктивные изменения воспроизводящих устройств 228
§ 3. Изменения электронных схем, повышающие надежность 233
§ 4. Изменения конструкции гидроузлов станков с ЧПУ 242
§ 5. Конструктивные доработки станков с ЧПУ, повышающие надежность 249
§ 6. Контроль работоспособности системы станков с ЧПУ 259
Глава VII. **Техническая подготовленность персонала, обслуживающего станки с системами ЧПУ** 269
§ 1. Влияние технической подготовленности наладчиков на поиск и устранение неисправностей 269
§ 2. Приборное оснащение наладчиков для качественного обслуживания систем ЧПУ 273
§ 3. Организация обслуживания станков с системами ЧПУ 284
Список литературы 293

ТЕХЛИТ

ВУЗ

«Машиностроение»

Л. В. Сергиевский

НАЛАДКА И РЕГУЛИРОВКА СТАНКОВ